ESTUDO DO EFEITO DE DIFERENTES TIPOS DE EMISSORES
NA PERFORMANCE DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR
ASPERSÃO PIVÔ-CENTRAL

ADUNIAS DOS SANTOS TEIXEIRA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. ANTONIO FERNANDO LORDELO OLITTA

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz", da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia, Área de
Concentração: Irrigação e Drenagem.

Estado de São Paulo
Agosto - 1992

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

T266e Teixeira, Adunias dos Santos
 Estudo do efeito de diferentes tipos de emissores
na performance de um sistema de irrigação por asper-
são pivô-central. Piracicaba, 1992.
79p. ilus.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Irrigação - Água - Aplicação 2. Irrigação^o -
Equipamento - Desempenho 3. Irrigação por pivô
central I. Escola Superior de Agricultura Luiz de
Queiroz, Piracicaba

ESTUDO DO EFEITO DE DIFERENTES TIPOS DE EMISSORES
NA PERFORMANCE DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR
ASPERSÃO PIVÔ-CENTRAL

ADUNIAS DOS SANTOS TEIXEIRA

Aprovada em: 18.08.1992

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta ESALQ/USP

Prof. Dr. José Antonio Frizzzone ESALQ/USP

Prof. Dr. Jairo Augusto de Araújo Campos FMVAJ/UNESP

Prof. Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta

Orientador

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Antonio Fernando L. Olitta pelo apoio, orientação e ensinamentos transferidos no decorrer do curso e na elaboração deste trabalho.

Ao professor Dr. José Antonio Frizonne pelas sugestões e orientação .

À ESALQ e CNPq pela oportunidade de fazer este curso de pós-graduação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural pelo convívio fraterno, amizade e apoio fundamentais na execução deste laborioso projeto.

Aos colegas do curso de pós-graduação em irrigação e drenagem e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a finalização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
SUMMARY	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Fatores que influenciam no desempenho do sistema	4
2.1.1. Influência do tipo do emissor e pressão de operação	5
2.1.2. Influência dos fatores climáticos	7
2.2. Uniformidade de distribuição de água	9
2.2.1. Aplicação do coeficiente de uniformidade ao pivô-central	12
2.3. Eficiência de irrigação	21
2.3.1. Eficiência de irrigação na parcela	22

2.4. Perfil de distribuição de água	27
2.4.1. Funções de distribuição de	
probabilidade	29
2.4.1.1. Distribuição normal	30
2.4.1.2. Distribuição gama	33
2.4.1.3. Distribuição linear	35
3. MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1. Coleta de dados para avaliação do desempenho do	
sistema	37
3.1.1. Características hidráulicas	38
3.1.2. Características eletro-mecânicas	41
3.1.3. Variáveis climáticas	41
3.2. Análise dos dados para determinação dos	
parâmetros de qualidade da irrigação	41
3.2.1. Determinação da uniformidade de	
aplicação de água	41
3.2.2. Distribuição de frequências acumuladas	
de lâminas	43
3.2.2.1 Valores observados	43
3.2.2.2. Funções de distribuição de	
probabilidade	44

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1. Verificação das características operacionais	48
4.2. Posição e tipo do emissor versus desempenho	53
4.3. Taxa de aplicação versus posição e tipo do emissor	56
4.4. Comparação entre metodologias para avaliar a uniformidade	58
4.5. Perfis de distribuição de água	61
A. Distribuição gama	61
B. Estimativa do melhor ajuste	63
4.6. Determinação dos parâmetros de qualidade da irrigação	65
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APÊNDICE	75

LISTA DE FIGURAS

	Página
Fig. 1. Representação das Áreas das Coroas	
Circulares	14
Fig. 2. Balanço de Massas no Sistema Solo-	
Água-Planta	22
Fig. 3. Perfil de Distribuição Adimensional . . .	28
Fig. 4. Posição dos Emissores em Relação à Superfície	
do Solo	40
Fig. 5. Velocidade de Campo versus Velocidade no	
Rele	50
Fig. 6. Lâmina versus Velocidade	50

LISTA DE TABELAS

	Página
Tab. 1. C_{11} e C_{22} para Diversas Condições de Operação	18
Tab. 2. Parâmetros de Qualidade da Irrigação	26
Tab. 3. Dados Gerais do Ensaio	49
Tab. 4. Parâmetros Climáticos Registrados Durante o Teste	52
Tab. 5. Valores de Pressões de Operação	53
Tab. 6. Valores de Taxas de Aplicação	57
Tab. 7. Valores de Uniformidade	59
Tab. 8. Parâmetros Estatísticos das Distribuições	62
Tab. 9. Desvios Máximos Observados	64

ESTUDO DO EFEITO DE DIFERENTES TIPOS DE EMISSORES NA
PERFORMANCE DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO
PIVÔ-CENTRAL

Autor: ADUNIAS DOS SANTOS TEIXEIRA

Orientador: PROF. DR. ANTONIO FERNANDO L. OLITTA

RESUMO

Com o objetivo de avaliar o efeito da posição e tipo do emissor no desempenho geral de um sistema de irrigação por aspersão tipo pivô-central, foram conduzidos 18 ensaios com "sprays" de placa defletora fixa e instalados em pendural a cerca de 1,0; 2,0 e 3,0 m do solo, montados na linha lateral e voltados para baixo, sobre o tubo do pivô e, "sprays" com placa defletora rotativa (rotators) posicionados sobre o tubo do pivô. Para cada posição foram conduzidos testes com o equipamento movimentando-se a 40, 60 e 80 % de velocidade.

Na determinação da performance do equipamento foram avaliadas a uniformidade de aplicação de água e as componentes de eficiências tais como: de aplicação, de aplicação em potencial, de armazenamento, de distribuição e perda de água por percolação profunda. As taxas de aplicação máxima e média também foram determinadas com um pluviógrafo instalado no ponto médio do segundo, terceiro e quarto vãos,

para os ensaios conduzidos a 40 % de velocidade.

Na avaliação da uniformidade de aplicação de água foram testados os métodos de Christiansen (CUC), Wilcox & Swayles (U), Heermann & Hein (CUC_u), Marek et alii ou do coeficiente de uniformidade estatístico (C_u).

Os métodos que têm o coeficiente de variação como parâmetro para medida de dispersão (U e C_u) apresentaram maior sensibilidade, especialmente na forma ponderada (C_u), sendo, portanto, recomendáveis.

Foram testadas as funções de distribuição de probabilidade gama e normal para previsão das áreas de déficit, excesso e posterior determinação das componentes do volume total para obtenção dos termos da eficiência de irrigação na parcela. Foi verificado que a função normal acumulada mostrou melhor ajuste, devendo ser recomendada para a faixa de coeficiente de variação estudada ($CV < 0,256$).

A posição relativa dos emissores exerce influência no desempenho geral do equipamento, sendo verificado redução no alcance do jato, afetando a sobreposição o que acarretou prejuízos à uniformidade de aplicação de água do sistema, com a aproximação do emissor da superfície do solo. No entanto, há um incremento na eficiência de aplicação em potencial do equipamento, devido a redução das perdas provocadas pela deriva do vento.

Também foi verificada nessa situação, a elevação nas taxas de aplicação média e máxima, o que pode

Também foi verificada nessa situação, a elevação nas taxas de aplicação média e máxima, o que pode vir a constituir-se em risco para equipamentos instalados em áreas que apresentam baixa capacidade de infiltração.

Para a situação estudada, recomenda-se a instalação dos emissores na posição mais próxima do solo, uma vez que não há o risco do escoamento superficial e/ou encharcamento e as perdas de água pela deriva do vento são minimizadas.

THE INFLUENCE OF THE KIND OF EMITTER IN THE CENTER PIVOT
SPRINKLER IRRIGATION SYSTEM

Author: ADUNIAS DOS SANTOS TEIXEIRA

Adviser: PROF. DR. ANTONIO FERNANDO L. OLITTA

SUMMARY

With the objective of evaluate the effect of the position and type of emitter in general performance of a center pivot irrigation system, 18 tests with the following variation were conducted: spray nozzle with fix plate installed about 1,0; 2,0 and 3,0 m distant of soil surface, installed under pivot pipe, installed over pivot pipe and spray nozzle with rotated plate installed over the pivot pipe, for 80, 60 and 40 % of equipament velocity.

To carактерize the equipament performance, the application uniformity and efficiency terms like: application efficiency, potential application efficiency, storage and delivery efficiency and water loses by deep percolation, were determined. The average and peak application rates were obtained with a pluviografy at the midpoint of the second, thirth and fourth span, for 40 % equipament velocity.

The water application uniformity was obtained by CHRISTIANSEN (CUC), WILCOX & SWAILES (U), HEERMANN AND HEIN (CUC_u) AND MAREK et alii or standard deviation uniformity coeficient (C_u) methods.

The methods based in the standard deviation (U and C_{std}) showed most sensible, especially in weigh forms, that was, therefore, recommend.

To predict the deficit and excess areas to subsequent determination of the total volume components of water applied by system and efficiency parameters, the normal and gamma distribution probability functions was confronted. The normal functions give the best agreement.

The relative position of the emittter had influenced the general performance of the equipament, due the legth diameter reduction, affecting the overlap that caused reductions in the water aplication uniformity. However, the potential application efficiency increased with the reduction in the drift wind water loses.

In these cases, the maximum and average application rates increased, what may be a dangerous situation in equipments installed at soils with reduced infiltration rates.

However, in cases of no runoff or storage surface potential, like the soil studied, we recommend the position of emitter installed nearest the soil surface, to minimize the wind drift water loses.

1. INTRODUÇÃO

Em termos de área utilizada para a agricultura, verifica-se, especialmente nas regiões sul e sudeste, que onde a infra-estrutura é facilmente disponível houve ocupação (PRONI, 1989), estando o aumento na produção agrícola associado a grandes inversões de capital.

O caminho mais curto a tomar para incrementar a produção é, portanto, o aprimoramento das técnicas agrícolas visando sempre a utilização otimizada dos recursos.

A otimização de recursos em agricultura irrigada pode ser traduzida na obtenção de métodos mais eficientes do preparo do solo à colheita e comercialização. Em se tratando da técnica específica da irrigação, a eficiência total de aplicação de água vai ditar os custos e receitas associados.

A utilização inadequada do fator água vai implicar custos maiores no bombeamento e da água em si, problemas de meio ambiente relacionados principalmente à salinidade em solos de regiões semi-áridas, sub-utilização de equipamentos de alto custo e reduções na produtividade.

A eficiência na utilização de água é avaliada seguindo-se duas linhas básicas, ou seja, pela determinação da uniformidade de aplicação de água e/ou pela eficiência de irrigação.

A uniformidade de aplicação de água mostra o quanto as lâminas aplicadas em pontos específicos da área irrigada diferem da lâmina média, sendo influenciado pela qualidade do equipamento e velocidade e direção do vento.

Do volume total de água aplicado pela irrigação, apenas uma porção é dita útil; o restante se constitui de perdas potenciais, sejam devidas à percolação para além da zona das raízes, escoamento para fora da área cultivada, deriva pelo vento, entre outras formas.

A eficiência de irrigação diz quanto do volume total aplicado ficou disponível para a planta utilizar em seu metabolismo sem quebra na produtividade, estando, portanto, diretamente relacionada com o custo de água e produtividade da cultura.

A integração de uma função que relacione as lâminas aplicadas com a área de coleta permite a obtenção dos diversos componentes do volume total acima citados, sendo possível a simulação do desempenho do sistema para diversos valores de lâmina requerida.

Com base no exposto foram definidos os seguintes objetivos:

i - Avaliar os parâmetros que atestam a qualidade da irrigação para um equipamento pivô-central equipado com:

- . "Sprays" instalados a cerca de 1,0; 2,0; e 3,0 m de altura em relação a superfície do solo ;
- . "Sprays" instalados diretamente na linha lateral e voltados para baixo ;
- . "Sprays" instalados sobre a linha lateral;
- . "Sprays" que apresentam placa defletora com movimento rotativo e instalados sobre a linha lateral (rotators) .

ii - Comparar a adequacidade dos modelos normal e gama no ajuste da função de distribuição para posterior obtenção dos parâmetros de qualidade da irrigação .

iii - Comparar as formas de determinação da uniformidade de aplicação de água propostas por CHRISTIANSEN (1942) e WILCOX & SWAILES (1947).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Fatores que influenciam no desempenho do sistema

O desempenho de um sistema de irrigação por aspersão em geral é avaliado através da distribuição da água partindo de um bocal, até atingir a superfície do solo ou cultura, podendo-se também considerar a distribuição no perfil do solo.

Desconsiderando o caminho tomado pela água no interior do solo, os fatores que influenciam no desempenho do sistema estão relacionados ao equipamento, às variáveis climáticas e ao modo como é feito o manejo (PAIR, 1968; HART & HEERMANN, 1976).

Associados ao equipamento citam-se o diâmetro dos bocais, ângulo de saída do jato, tipo de emissor, pressão de operação e espaçamento entre emissores, dentre outros. O vento (velocidade e direção) é o principal fator associado ao clima que comanda o desempenho do sistema. No manejo do sistema deve-se considerar o alinhamento da linha lateral,

velocidade de rotação do sistema, pressão de operação.

Estes fatores interagem entre si. Por exemplo, o diâmetro dos bocais e tipo do emissor relacionado com a pressão de operação determinam o diâmetro das gotas do jato que tendo menores dimensões, *têm maior superfície exposta por volume de líquido lançado sendo mais susceptíveis à evaporação e ao carreamento pelo vento* (LONGLEY *et alii*, 1983).

2.1.1. Influência do tipo de emissor e pressão de operação

Os emissores mais comumente utilizados em pivô-central estão divididos em duas classes: aspersores de impacto de alta pressão (superior a 2,5 kgf/cm² ou 240 kPa) e difusores que funcionam na faixa de pressão entre 100-175kPa (1,05 - 1,76 kgf/cm²), onde a água é aspergida continuamente em todas as direcções radiais.

Nestes últimos o jato saindo de bocais encontra um anteparo localizado perpendicularmente, sendo então fracionado. Este anteparo apresenta diversas variações, podendo ser liso ou estriado e com diferentes angulações, apresentando movimento (rotators) ou não.

Os emissores de alta pressão são geralmente instalados sobre a tubulação e os difusores podem ser

encontrados nesta posição, ligeiramente abaixo da tubulação lateral, em tubos de descida (pendurais) que vão de alguns centímetros a 3,0 m, ou agrupados em um tubo de derivação conhecido como "spray boom".

Autores como LONGLEY *et alii*(1983), citam que o uso de emissores de baixa pressão implica em menor altura manométrica total, com conseqüente diminuição no custo de bombeamento. von BERNUTH & GILLEY (1983) estimam que nos Estados Unidos, cerca de 90 % dos equipamentos instalados em 1984 foram projetados para trabalhar a pressões inferiores a 240 kPa (2,5 Kgf/cm²) contra 80% projetados para pressões superiores a 450 kPa (4,5 kgf/cm²) nos anos anteriores.

LONGLEY *et alii*(1983) lembram, no entanto, duas características indesejáveis associadas aos difusores, quais sejam a redução no diâmetro molhado em relação aos aspersores de impacto (cerca de 10 m contra 30 m), e no diâmetro médio de gotas (de 3 a 6mm para cerca de 1 a 3mm).

A redução no diâmetro de gotas torna-as mais susceptíveis à evaporação e à deriva pelo vento. A maior perda por evaporação deve-se ao aumento na área de superfície por unidade de volume. O transporte das gotas a uma distância maior é conseqüência da diminuição da massa e do momento.

Segundo JAMES *et alii*(1982) e von BERNUTH & GILLEY (1983), a utilização de emissores de baixa pressão

pode ser acompanhada das seguintes desvantagens :

- 1) redução na área molhada, o qual pode acarretar aumento na taxa de aplicação, predispondo à ocorrência de escoamento superficial;
- 2) redução na uniformidade de aplicação de água devido à diminuição na área de aplicação; maior sensibilidade às variações de pressão, especialmente em terrenos declivosos; alteração do padrão triangular de distribuição por formas que acarretam taxas mais elevadas próximas à extremidade do jato, além dos choque dos jatos adjacente;
- 3) o custo de investimento necessário para serem instalados dispositivos capazes de sanar as causas acima citadas, tais como "spray boom" e "rotatores" são bem elevados.

2.1.2 Influência dos fatores climáticos

Em pivô-central, a orientação do vento interage com as condições climáticas, provocando maiores ou menores perdas. Segundo **STEINER et alii (1982)** em casos de ventos incidindo transversalmente à linha do pivô, sendo a demanda evaporativa alta, as perdas de água serão máximas, em comparação com o vento incidindo paralelamente, independente da demanda evaporativa. Isto ocorre porque a massa de ar que passa sobre o equipamento é arrefecida e umidificada.

A influência do vento no jato aspergido

manifesta-se também na redução do alcance no sentido oposto ao vento, aumento no sentido paralelo e alterações pouco significativas na direção transversal ao vento (SHULL & DYLLA, 1976b).

Estas alterações provocam deposição diferenciada de água na área de aplicação do sistema, com reflexos na uniformidade de aplicação de água (VORIES & von BERNUTH, 1985).

VORIES & von BERNUTH (1985) e von BERNUTH (1989) utilizaram um modelo computacional para verificar o efeito do tipo de bocal, ângulo de saída e pressão de operação, interagindo com o vento, no alcance do jato e distribuição de água por um aspersor. Verificaram que para velocidades de vento superiores a 8,0 m/s, o alcance máximo era atingido com um ângulo de saída igual ou inferior a 5°; enquanto que na ausência de ventos, o alcance máximo era atingido com um ângulo de 29°.

Constatarem ainda que nestas condições, gotas com diâmetro inferior a 0,6 mm caíram ao lado do aspersor; enquanto as maiores que 3,4 mm percorreram distância superior a 8,0 m. Em contrapartida, na ausência de vento, atingiram, respectivamente, 9 e 14 m.

A altas velocidades de vento, o jato forma uma espécie de espiral, ocasionando choques e precipitação das

gotas. Isto ocorre quando a componente horizontal da velocidade da gota é anulada pela força de arrastamento do vento antes da componente vertical ser superada pela força gravitacional, a cerca de 10 m/s em gotas de 0,0034 m partindo de ângulo de 25° em aspersor operando a 400 kPa.

2.2. Uniformidade de distribuição de água

CHRISTIANSEN(1942), trabalhando com distribuição de água em sistemas de irrigação por aspersão, preconizou o uso de um coeficiente (CUC) onde a uniformidade era avaliada pela relação entre o desvio médio absoluto das lâminas (X_i) ou volumes (V_i) e a lâmina ($\bar{X}$) ou volume médio ($\bar{V}$), apresentado na forma a seguir :

$$CUC=100(1,0-\frac{\sum_{i=1}^n |X_i-\bar{X}|}{n.\bar{X}}) \dots \dots \dots (1)$$

Este coeficiente nada mais é que uma medida de dispersão, como a amplitude, desvio padrão (s) e Coeficiente de Variação (CV). No entanto o seu uso freqüente deve-se à maior facilidade de cálculos na época e a adoção em massa, o que o tornou um parâmetro de comparação entre um trabalho e outro.

WILCOX & SWAILES (1947) propuseram uma metodologia para avaliar a uniformidade da irrigação por

aspersão. Esse modelo tem por base o desvio padrão como medida de dispersão.

O coeficiente de Uniformidade de WILCOX & SWAILES (U) também denominado coeficiente de uniformidade estatístico ficou assim definido:

$$U=100(1-\frac{s}{\bar{X}}) \dots \dots \dots (2)$$

onde s representa o desvio padrão e $\bar{X}$ lâmina ou volume médio precipitado no coletor.

HART (1961) e HART & REYNOLDS (1965) deram um tratamento estatístico mais apurado ao Coeficiente de Uniformidade de Christiansen através do estudo da função normal, dando assim um significado físico à uniformidade. Consideraram a propriedade desta distribuição de que o valor do desvio médio absoluto $(\sum |X_i - \mu|/n)$ é igual a $\sqrt{\frac{2\sigma}{\pi}}$, onde μ e σ , são respectivamente, média e desvio padrão da população.

Assim, admitindo uma amostra limitada e substituindo o novo termo na equação do CUC, HART sugeriu a seguinte expressão para o cálculo da uniformidade :

$$CUH=1-0,798\frac{s}{\bar{X}} \dots \dots \dots (3)$$

sendo, CUH o coeficiente de uniformidade de Hart, também

simbolizado por $HSPA^1$.

A conotação física desta análise pode ser vista reagrupando-se a eq. (3) na forma abaixo :

$$CUH.\bar{X}-\bar{X}-0,798s. \dots\dots\dots (4)$$

Verifica-se que a área sob a curva normal de $\bar{X} - 0,798s$ ($z = 0,798$) até ∞ representa 79 % da área total sob a curva, isto é, 79 % da área de aplicação receberá uma lâmina igual ou superior a $(CUH.\bar{X})$ se a distribuição de probabilidade das lâminas de água área de coleta tender à curva normal.

Para atestar a normalidade de uma distribuição, a um certo nível de significancia, com média e desvio padrão conhecidos, CAMPOS (1983) sugere a aplicação do teste não paramétrico de KOLMOGOROV-SMIRNOV.

Este teste apresenta vantagens em relação a outros como o qui-quadrado, tais como, ser aplicado sem restrições a pequenas amostras e tratar os dados individualmente, não havendo perda de informações devida a agrupamentos.

HART (1961) estendeu a análise ao coeficiente

¹Em alusão a *Hawaiian Sugar Planter's Association*

de uniformidade de distribuição (CRIDDLE, 1956)² - PE_u , o qual representa a relação entre a média dos menores valores de lâmina precipitados em 25 % da área irrigada e a lâmina média geral. Este coeficiente diz que 75 % da área recebe no mínimo a média das menores lâminas. Este valor corresponde à abscissa z igual a 1,27 indicando que no mínimo 10 % da área recebeu a lâmina mínima, ou seja, $z = \frac{\bar{x} - 1,27s}{\bar{x}}$. Assim, a expressão para o cálculo de PE_u converte-se em :

$$PE_u = 1 - 1,27 \frac{s}{\bar{x}} \quad (5)$$

BENAMI (1984) chama a atenção para o fato de que nestes coeficientes, os valores positivos e negativos do desvio afetam da mesma forma a uniformidade, muito embora seja consenso que, em caso de solo bem drenado, uma situação de deficit hídrico exerce maior influência na produtividade final que em caso de excesso.

2.2.1. Aplicação do coeficiente de uniformidade ao pivô- central

No sistema de irrigação denominado pivô-central a área coberta pelos emissores aumenta a medida que se afasta do centro de rotação, conforme pode ser visto na Figura 1.

²CRIDDLE, W.D. et alii *Methods of Evaluating Irrigation Systems. Agricultural Handbook # 82, Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1956.*

Portanto, o volume aplicado em cada sub-área ou coroa é sempre crescente.

HEERMANN & HEIN (1968) propuseram o cálculo da uniformidade de Christiansen - CUC considerando o volume (V_i) associado a cada coroa circular abrangida pelo coletor, incluindo, dessa forma, uma "ponderação" para a lâmina coletada.

Figura 1 - Representação das áreas das coroas circulares

A equação do CUC ficou assim definida :

$$CUC = 100 \left(1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}|}{n \cdot \bar{V}} \right) \dots \dots \dots (6)$$

sendo V_i o volume precipitado sobre a i -ésima área (A_i),
obtido pelo produto da lâmina precipitada no i -ésimo coletor
(X_i), pela área de abrangência do mesmo, ou seja :

$$V_i = A_i \cdot X_i \dots \dots \dots (7)$$

A área de abrangência de cada coletor é obtida pela relação:

$$A_i = \pi \cdot R_{2i}^2 - \pi \cdot R_{1i}^2 \quad [8]$$

com

$$R_{1i} = R_i - S/2$$

$$R_{2i} = R_i + S/2$$

sendo S o espaçamento entre coletores, aqui considerado constante, e R_i a distância do centro de rotação do pivô central ao i -ésimo coletor. A eq. (8) pode ser então simplificada para a seguinte forma :

$$A_i = 2 \pi S R_i \quad (9)$$

substituindo [9] em [7], tem-se :

$$V_i = 2 \pi R_i S X_i \quad (10)$$

O volume médio ($\bar{V}_i$) coletado na i -ésima sub-área é igual ao produto desta pela lâmina média ($\bar{X}$), isto é:

$$\bar{V}_i = \bar{X} \cdot A_i \quad [11]$$

A lâmina média é obtida pela relação entre o volume total coletado e a área total. Assim :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \dots \dots \dots (12)$$

O volume médio ($\bar{V}$) aplicado pelo sistema é dado por :

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i X_i}{n} \dots \dots \dots (13)$$

de onde se obtém que:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n 2\pi S X_i R_i}{n} \dots \dots \dots (14)$$

Substituindo-se as equações [14], [11] e [10] em [6], tem-se:

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n 2\pi X_i R_i S - \frac{2\pi R_i S \sum_{i=1}^n 2\pi X_i R_i S}{\sum_{i=1}^n 2\pi R_i S}}{\sum_{i=1}^n 2\pi X_i R_i S} \right] \dots \dots (15)$$

De onde tem-se que :

$$CUC = 100 \left[1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n R_i X_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}}{\sum_{i=1}^n X_i R_i} \right] \dots \dots \dots (16)$$

MAREK *et alii* (1986) criticam o coeficiente de Christiansen ao afirmar que o uso do desvio médio anula o efeito das lâminas muito dispersas em relação à média no valor final do Coeficiente de Uniformidade (CU). Sugerem

então, o uso do desvio padrão, conforme o fizeram WILCOX & SWAILES (1947).

Segundo estes autores, o uso do desvio padrão, o qual enfatiza os desvios maiores em relação à média, aumenta a sensibilidade do CU, sendo útil especialmente para a avaliação de equipamentos de irrigação pivô-central que apresentam obstruções ou danos nos emissores, os quais podem ser perfeitamente detectados e o equipamento reparado.

Propuseram então para o caso do pivô-central, a análise sob a ótica dos volumes coletados nas coroas circulares, obtendo a seguinte equação para a estimativa da uniformidade da irrigação :

$$C_{WSD} = 100 \left[1,0 - \sqrt{\frac{\frac{\sum_{i=1}^n R_i X_i - \frac{\left(\frac{R_i \sum_{i=1}^n R_i X_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \right)^2}{n-1}}{\frac{\sum_{i=1}^n R_i X_i}{n}}}{\frac{\sum_{i=1}^n R_i X_i}{n}}} \right] \dots \dots (17)$$

sendo :

C_{WSD} : Coeficiente de Uniformidade Estatístico Ponderado .

A Tabela 1 apresenta o confronto entre valores de uniformidade obtidos pela metodologia de HEERMANN & HEIN (1968) e MAREK *et alii* (1986).

Tabela 1 - C_{HH} e C_{VSS} Para diversas condições de operação

SITUAÇÃO E LOCALIZAÇÃO	C_{HH}	C_{VSS}	VARIAÇÃO(%)	
			C_{HH}	C_{VSS}
Bocais bem projetados	93	91	-	-
1 bocal aberto a 366 m	87	63	6,5	30,8
1 bocal obstruído a 366 m	88	70	5,4	23,1
3 bocais abertos a 183, 274 e 366 m	79	56	15,1	38,5
3 bocais obstruídos a 183, 274 e 366 m	80	60	14,0	34,1
1 bocal quebrado a 183 m e dois obstruídos a 274 e 366 m	82	58	11,8	36,3

FONTE : HAREX *et alii* (1986)

Os resultados mostram que além dos valores de C_{VSS} serem inferiores, exaltando os grandes desvios em relação à média, apresentam uma amplitude maior de variação, implicando em maior sensibilidade.

Em trabalhos realizados pelo IPT (1985) é utilizada a forma simplificada da equação de uniformidade, onde as lâminas são submetidas a uma "ponderação" pelo respectivo número do coletor de onde foi extraída.

Neste caso, os coletores devem ser obrigatoriamente instalados a espaçamentos constantes e numerados na escala natural em ordem crescente a partir do centro de rotação do pivô.

A simplificação é efetuada considerando-se:

$$\begin{aligned} R_1 &= 1 \cdot S \\ R_2 &= 2 \cdot S \\ &\vdots \\ R_i &= n_i \cdot S \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (18)$$

e,

$$\sum X_i R_i = \sum X_i n_i S = S \sum X_i n_i \quad \dots \quad (19)$$

Assim, substituindo-se as equações [18] e [19] na equação [16] e [17] e simplificando, têm-se as formas ponderadas do CUC e CWSD, respectivamente.

$$CUC = 100 \left[1,0 - \frac{\sum_{i=1}^N n_i X_i - \frac{\sum_{i=1}^N n_i X_i}{\sum_{i=1}^N n_i}}{\sum_{i=1}^N n_i X_i} \right] \dots \dots \dots (20)$$

$$C_{NSD} = 100 \left[1,0 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n n_i^2 \left(X_i - \frac{\sum_{i=1}^n n_i X_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \right)^2}{n-1}} \right] \dots \dots (21)$$

sendo :

n_i : número correspondente ao i-ésimo coletor ;

A metodologia proposta pelos autores pressupõe que a lâmina precipitada dentro da sub-área apresenta uniformidade de 100 % . Isso conduz a uma limitação no espaçamento entre coletores.

Os últimos coletores têm um peso muito elevado na determinação da uniformidade. Portanto, para que não se tenha uma uniformidade bastante alterada devido aos últimos emissores apresentarem pequena lâmina precipitada, suas leituras devem ser descartadas.

A literatura em geral cita um valor recomendável de no mínimo 80 % para o coeficiente de uniformidade de Christiansen, enquanto BENAMI (1984) propõe um mínimo de 82 % em projetos de irrigação para Israel.

Deve-se considerar no entanto, que embora altos valores de uniformidade impliquem em maiores produtividades

esperadas, os custos envolvidos também aumentam. Portanto, na escolha de um valor de coeficiente de uniformidade deve-se considerar também o aspecto econômico associado.

2.3. Eficiência de irrigação

Os métodos de estimativa de uniformidade sugeridos por CHRISTIANSEN(1942), WILCOX & SWAILLES(1947), BENAMI(1978) consideram apenas o grau de dispersão com que a água é aplicada pelo sistema em relação a um valor médio, não estando incluída qualquer conotação física.

Como foi visto, CRIDDLE (1956), HART (1961) e HART & REYNOLDS(1965) trazem em seus estudos interpretações físicas da distribuição de água. Um trabalho mais consistente a cerca da performance do sistema deve incorporá-las, tornando possível, inclusive, a simulação do desempenho do sistema para diversas situações operacionais.

Nesta ótica estão inseridos os conceitos de eficiência e modelos de função de distribuição de probabilidade estudados por HOWELL (1964), HART & REYNOLDS (1965), NORUM (1966), KARMELI (1978), FAZAL (1978) E WALKER (1979). Estas medidas de eficiência dependem tanto da uniformidade como da forma com que o sistema de irrigação é operado (FRIZZONE, 1992)

2.3.1. Eficiência de irrigação na parcela

Para compreensão das componentes envolvidas nas perdas e eficiência de distribuição de água pelo sistema dentro da unidade de irrigação, KRUSE et alii (1977) desenvolveram o esquema ilustrado do balanço de massa no sistema solo-água-plantas mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Balanço de massas no sistema solo-água-plantas

Do volume total aplicado (VT), parte da água fica depositada na zona das raízes estando disponível para as plantas (V_s); outra parte é constituída de perdas potenciais, seja por evaporação (V_{ev}), deriva pelo vento (V_v), percolação (V_p), escoamento superficial (V_e), interceptação pelas plantas (V_{int}).

Segundo **NORMANN & CAMPBELL (1982)**, grande parte da água interceptada pela superfície foliar é perdida por evaporação. Porém, **STEINER et alii (1982)** são enfáticos ao afirmar que esta evaporação reduz a transpiração potencial das plantas, não devendo ser considerada perda propriamente dita. Estes autores trabalhando com milho estimaram o volume interceptado pela superfície das plantas em 2 a 4% do volume total bombeado. Já as perdas por evaporação e vento juntas chegaram a atingir até 15 % do volume total, sendo fortemente influenciado pelo déficit de pressão de vapor e intensidade e direção do vento.

Estas perdas podem ser bastante reduzidas pela operação do sistema em horário favorável.

Os sistemas de irrigação em geral são projetados de modo que a taxa de infiltração nunca seja inferior à taxa de aplicação de água do sistema, de modo que as perdas por escoamento sejam evitadas (**DILLON et alii, 1971**).

Um sistema de irrigação, qualquer que seja, deve ser dimensionado de modo que as perdas de água sejam mínimas, isto é, máximas as componentes de eficiência.

MATSURA(1987) e **FRIZZONE(1992)** citam os seguintes parâmetros para atestar a qualidade da irrigação por aspersão :

. Eficiência de aplicação (E_a)

Mede a fração do volume total aplicado que ficou disponível para a cultura, dado pela seguinte relação:

$$E_a = \frac{\text{Volume de água armazenado na zona das raízes (V_s)}}{\text{Volume aplicado pelo sistema (V_T)}} \quad (22)$$

é um indicador do excesso de água aplicado ao campo durante a irrigação, não refletindo a capacidade da irrigação em repor a lâmina requerida na zona das raízes (WALKER, 1979), não devendo ser analisado isoladamente.

Através da decomposição do volume total nos diversos componentes, tem-se:

$$E_a = \frac{V_s}{V_{ev} + V_v + V_e + V_s + V_p} \quad (23)$$

e, multiplicando-se o numerador e denominador da eq (23) por $(V_p + V_s)$, resulta :

$$E_a = \frac{V_s}{V_p + V_s} \cdot \frac{V_p + V_s}{V_{ev} + V_v + V_e + V_s + V_p} \quad (24)$$

sendo então definidos dois novos parâmetros, quais sejam:

. Eficiência de distribuição (Ed)

Mede o volume de água armazenado na profundidade efetiva do sistema radicular em relação ao volume total infiltrado, dando uma idéia de perdas por percolação profunda, dado por :

$$Ed = \frac{Vs}{Vp + Vs} \quad (25)$$

. Eficiência de Aplicação em Potencial (Eap) ou Razão Efetiva de Aplicação (RE)

Representa a fração de água aplicada que é absorvida pelo solo através da infiltração. Mede, portanto, as perdas de água por fatores outros que não a percolação profunda, isto é, deriva ao vento, evaporação, dentre outras. Representado numericamente por :

$$Eap = \frac{Vp + Vs}{Vev + Vv + Ve + Vs + Vp} \quad (26)$$

. Eficiência de Armazenamento (Es)

Representa a fração do armazenamento de água na

zona das raízes (no momento da irrigação) que foi preenchido pela irrigação.

$$E_s = \frac{\text{Volume armazenado na zona das raízes (V_s)}}{\text{Volume requerida para preencher o armazenamento de água na zona radicular (V_r)}} \quad (27)$$

. Perda por Percolação Profunda (Dp)

Fornece uma estimativa das perdas ocorridas por percolação, devido a um excesso de deposição de água em pontos da área irrigada. Matematicamente é dada por :

$$D_p = \frac{\text{Volume percolado (V_p)}}{\text{Volume aplicado pelo sistema (V_T)}} \quad (28)$$

HART et alii (1978) classificaram a qualidade da irrigação considerando a seguinte faixa de valores mostrada na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da irrigação

PARAMETRO	EXCELENTE	SATISFATÓRIA	NAO SATISF
Es	≥ 0,80	≥ 0,50 e < 0,80	< 0,50
Dp	≤ 0,20	≥ 0,20 e < 0,50	> 0,50
Ed	≥ 0,80	≥ 0,60 e < 0,80	< 0,60

Fonte : HART et alii (1978)

Segundo os autores, cuidados devem ser tomados na interpretação dos resultados, pois, um sistema de irrigação aplicando água produzindo uma área bem irrigada e outra completamente seca podem apresentar a mesma Ud que um sistema cuja áreas irrigadas apresentem deficit e excesso em doses aceitáveis. Em regiões onde a irrigação é suplementar o sistema pode ser projetado para preencher apenas parcialmente o armazenamento requerido (hr), deixando o resto a cargo das chuvas naturais. Neste caso, podem ser verificados baixos valores para os índices de desempenho, sem prejuízos de produtividade. Um ensaio de irrigação pode sofrer alta influência do vento e a distribuição ao longo do ciclo de cultivo compensar as falhas ocorridas.

2.4. Perfil de distribuição de água

Segundo **HART et alii (1978)**, a representação da distribuição de lâminas por área de coleta pode ser feita de três formas: (1) utilizando-se os valores numéricos das lâminas coletadas e áreas(ou distâncias) a qual estas representam - muito comum em análises prévias de pivô central; (2) através da utilização de valores numéricos de lâminas plotadas contra frequência de área: ou, (3) lâminas adimensionalizadas contra frequência acumulada de área.

A primeira forma tem a vantagem da

identificação pronta de possíveis problemas no campo, uma vez que um valor de lâmina fortemente discrepante da lâmina média é facilmente associado a um ponto fisicamente identificável na área do sistema.

As duas últimas representações trazem a vantagem do ajuste matemático dos valores das lâminas contra a frequência de área, permitindo a simulação do desempenho do sistema para diferentes lâminas de manejo.

HART *et alii* (1978) citam o perfil de distribuição mostrado na Figura 3 para representar os diversos parâmetros de performance de um sistema de irrigação por aspersão.

Figura 3 - Perfil de Distribuição Adimensional

Os valores dos volumes ilustrados na FIGURA 3 podem ser representados via integração numérica, caso a

função que ajusta a distribuição seja conhecida.

O comportamento da Função de Distribuição de Probabilidade - FDP foi estudado por diversos autores, dentre os quais, **HART & REYNOLDS (1965)** que consideraram o ajuste dos dados à curva de Gauss; e, **KARMELI (1978)** que propôs a utilização de modelos lineares.

Diversos outros autores têm trabalhado o modelo normal sugerido por **HART & REYNOLDS (1965)**, como **FAZAL (1978)** ao propor a utilização da distribuição gama, da qual a distribuição normal pode ser vista como um caso; **WALKER (1979)** que através de regressões chegou a equações que simplificam o uso da distribuição normal, abolindo a necessidade de integração numérica de equações ou da utilização de tabelas estatísticas.

2.4.1. Funções de distribuição de probabilidade

A obtenção de uma função que relacione os valores adimensionais de lâminas à área acumulada conduz a uma série de vantagens, como a possibilidade de elaboração de programas computacionais, os quais permitem maior facilidade nos cálculos de eficiência e simulação das condições de funcionamento do sistema, isto é, obtenção dos parâmetros de qualidade e retorno econômico quando alteram-se os valores de lâmina requerida.

2.4.1.1. Distribuição normal

A variável aleatória X , definida para todos os valores reais segue uma distribuição normal (ou Gaussiana) se a função densidade de probabilidade for da forma :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \dots\dots\dots (29)$$

com,

$$\begin{aligned} -\infty < X < +\infty \\ -\infty < \mu < +\infty \\ \sigma > 0 \end{aligned}$$

sendo:

$f(x)$: probabilidade de ocorrer a variável aleatória X ;

μ : média da população ;

σ : desvio padrão da população .

A probabilidade acumulada, isto é, a proporção de valores de X menores ou iguais a um valor arbitrário b é numericamente igual à integral da Equação (29) de $-\infty$ a x , ou seja,

$$F(x) = P(-\infty \leq X \leq x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \dots\dots (28)$$

Esta função tem as seguintes propriedades:

$$P(-\infty \leq X \leq +\infty) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} = 1,0$$

$$f(-x) = f(x)$$

$$F(-x) = 1,0 - F(x)$$

Estas propriedades resultam do caracter simétrico da função normal" (MEYER, 1983).

A função de probabilidade acumulada encontra-se tabelada ou pode ser obtida por aproximação polinomial conforme cita ABROMOWITZ & STEGUN (1972).

Segundo HART & REYNOLDS (1965), é conveniente definir a variável h_1 que representa a lâmina adimensionalizada pela média, isto é,

$$h_1 = \frac{x_1}{\bar{x}} \rightarrow x_1 = h_1 \cdot \bar{x} \dots \dots \dots (29)$$

Assim, fazendo-se $F(x) = a$, tem-se :

$$a = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\bar{x}_1}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{h_1 - 1}{cv} \right)^2} dx \dots \dots \dots (30)$$

onde a representa a fração da área na curva normal para valores de x_1 de $\bar{x}$. h_1 a ~~100~~, significando que a área a vai receber no mínimo a lâmina requerida ($x.h_1$) adotada no manejo e, portanto, teremos "a %" de área em déficit e " 100 - a %" adequadamente irrigada.

Os autores apresentam um estudo onde a eficiência de aplicação e área de deficit são tabulados para

valores variáveis de CV e h_f .

WALKER (1978) partindo da hipótese de que a FDP de lâminas se ajusta ao modelo normal, desenvolveu uma série de equações empíricas para obtenção dos fatores sugeridos por HART & REYNOLDS(1965) sem a necessidade de integração numérica ou da utilização de tabelas.

Pelo fato da função normal acumulada ser assíntota para valores de $x = 0$ e $x = 1$, foi necessário definir um parâmetro, Δ' o qual é função do coeficiente de variação(CV) e que, para propósitos numéricos, representa o valor da função quando $x = 0$. No modelo:

$$\Delta' = 3,643 \cdot CV \dots \dots \dots [31]$$

O valor da ordenada correspondente a $(1 - \Delta')$ estimado pelo modelo é de aproximadamente 10^{-4} .

A área em déficit, A_D , (ou a no modelo de HART) é estimada por:

$$A_D = \left(\frac{3,634 \cdot CV - \Delta}{1,123 \cdot CV} \right)^{3,3223} \dots \dots \dots (32)$$

onde, $\Delta = 1 - h_f$

e o volume adimensional de déficit, V_d , dado por :

$$V_D = 0,003 \cdot CV \cdot A_D^{1,233} \dots \dots \dots (33)$$

As eficiências de aplicação, E_a , e armazenamento, E_s , foram estimadas por :

$$E_a = 1001 - CV(3,634 - 1,123A_D^{0,3} + 0,003 A_D^{1,233}) \quad (34)$$

$$E_s = 100 \left(\frac{E_a}{[1 - CV(3,634 - 1,123 A_D^{0,3})]} \right) \dots \quad (35)$$

No modelo, a eficiência de aplicação é estimada com um erro inferior a 4 %. Para $A_p < 10$ %, o erro cresce rapidamente para cerca de 10 % ou mais. O autor estima um erro máximo de 2 % na determinação da eficiência de armazenamento.

2.4.1.2. Distribuição gama

Duas características da distribuição normal conduzem na prática a incoerências. A primeira reside no fato desta ser definida para $-\infty \leq x \leq \infty$; isto é admitir valores negativos de taxa de aplicação (h_i) mínima; a segunda de ser simétrica (FAZAL, 1978).

Na distribuição gama, o valor de área de déficit, a , incorpora o efeito da assimetria, conforme pode ser visto nas equações que se seguem :

$$a = 1 - \int_0^{h_i \bar{x}} \frac{1}{\Gamma(r)} x^{r-1} e^{-x} dx = 1 - \frac{\gamma_r}{\Gamma(r)} \dots \quad (36)$$

$$r = \frac{4}{C_s^2} \dots \dots \dots (37)$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{s^3 N} \dots \dots \dots (38)$$

onde:

$\Gamma(r)$: função gama completa;

C_s : coeficiente de assimetria ;

$\gamma(r)$: função gama incompleta ;

r : parâmetro da distribuição .

A relação entre lâmina de déficit (D_i) e CV, para um valor de lâmina, X_a , bem como a relação entre esta razão e a eficiência de aplicação também imbuem o efeito da assimetria, uma vez que :

$$\frac{D_a}{CV} = \frac{1}{\sqrt{r}} \left[X_a - \frac{\gamma_{ra}(r+1)}{\gamma_{ra}(r)} \right] \dots \dots \dots (39)$$

e,

$$\frac{1 - E_a}{CV} = \frac{D_a}{CV} (1 - a) - \frac{(X_a - r)}{\sqrt{r}} \dots \dots \dots (40)$$

FAZAL(1978) trabalhando com sistemas de irrigação por aspersão concluiu que a assimetria provoca aumento na eficiência de aplicação para valores de h_i menores ou iguais a 1 (um); e diminuição desta para $h_i=1,2$, em relação à hipótese da distribuição simétrica. A magnitude

desse efeito é maior para valores de h_i inferiores a um (01), isto é, quando a lâmina média de água aplicada for maior que a lâmina requerida, sendo insignificante para $h_i = 1,1$.

Para distribuições com alta uniformidade, isto é, CV baixo, a eficiência de aplicação é igual à taxa de aplicação, h_i , somente se a última for diferente de 1 (um), contradizendo a generalização de HART & REYNOLDS(1965).

Quanto mais h_i se desvia da unidade e a assimetria se torna positiva, maior a faixa de uniformidade na qual a eficiência de aplicação é constante. Isto leva a concluir que as vantagens advindas da tentativa de buscarem-se uniformidades mais elevadas são pequenas se a lâmina distribuída for muito diferente da real necessária.

Para $h_i = 1$, ou seja, a lâmina requerida para uma irrigação adequada igual à lâmina média aplicada, existe uma relação linear entre a eficiência de aplicação e o coeficiente de variação.

2.4.1.3. Modelo linear de Karmeli

KARMEI (1978) trabalhando com 36 padrões de distribuição de água, divididos em três grupos de coeficiente de variação ($CV < 0,38$; $0,38 < CV < 0,62$; $CV > 0,62$) sugeriu o uso de uma regressão linear simplificada para correlacionar áreas com lâminas adimensionais .

Segundo o autor, enquanto o modelo normal é válido para faixas de coeficiente de variação entre médio e baixo; o ajuste linear é adequado para todas as situações estudadas. Porém, pela observação dos dados mostrados em seu trabalho e considerando o erro de estimativa gerado pelos dois ajustes, fica claro que para valores de $CV < 0,38$, o modelo proposto pelo autor não ajusta com perfeição a função de distribuição linear. Isto porque os valores extremos tendem a apresentar uma variação muito grande em relação aos valores intermediários.

Conclui-se portanto que a utilização do modelo de KARMELI é apropriada em sistemas de irrigação que apresentem altos valores de CV, isto é, baixa uniformidade e/ou quando se deseja simplificação na obtenção dos parâmetros de qualidade da irrigação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para cumprir os objetivos previamente estabelecidos, foi utilizado um equipamento de irrigação pivô-central pertencente à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo-Piracicaba-Brasil.

O equipamento, fabricado pela DANTAS S.A. tem as seguintes características construtivas :

- . Comprimento : 165,79 metros
- . Comprimento até a última torre : 155,10 m
- . Área útil irrigada : 8,635 ha
- . Número de Vãos : 4
- . Espaçamento médio entre emissores : 2,0 m

3.1. Coleta dos dados para a avaliação do desempenho do sistema

A condução dos ensaios seguiu o projeto de norma nº 12:02.08-005 "SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO PIVÔ CENTRAL - CARACTERÍSTICA DE DESEMPENHO / Método de Ensaio" da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

3.1.1. Características hidráulicas

Para a caracterização do desempenho hidráulico do equipamento foram determinadas a lâmina aplicada, a pressão de operação no ponto do pivô e na entrada de alguns emissores, a vazão do sistema e a largura do padrão molhado no último vão.

Na determinação das lâminas precipitadas foram instaladas duas linhas radiais de coletores, formando um ângulo de 3° entre si.

A fim de facilitar a identificação, as linhas foram denominadas de A e B, respectivamente, para a direita e esquerda, considerando o sentido horário de rotação. Os coletores foram numerados na escala natural e em ordem crescente.

Como coletores, foram utilizados recipientes próprios confeccionados em alumínio, os quais apresentaram diâmetro de 0,105 m e estavam instalados em tripês espaçados de 3,0 m um do outro e a uma altura de 0,30 m do solo. As lâminas foram obtidas, dividindo-se os volumes coletados em cada coletor pela área do recipiente.

Para evitar a evaporação da água do coletor foi adicionado cerca de 10 ml de óleo diesel antes do início do teste.

A pressão de operação do pivô, medida no centro

de rotação, foi determinada por meio de um manômetro Bourdon com glicerina e escala de 0,0 a 980 kPa (10,0 Kgf/cm²) e graduação de 9,8 kPa (1,0 Kgf/cm²). Esta foi sempre mantida em 28,8 kPa (3,0 Kgf/cm²).

A pressão na entrada do emissor foi determinada nos três vãos ensaiados em dois pontos localizados a 13,0 m e 27,0 m da torre e no lance em balanço em um ponto a 5,0 m da última torre. Para tanto foram utilizadas tomadas de pressão ligadas a um transdutor de pressão graduado de 0 a 19,05 kPa (5 bar) e precisão de 0,1 kPa (0,01 bar).

A vazão total do sistema foi determinada utilizando-se uma derivação da linha de adução. Assim, fez-se a pressão de operação da bomba com a derivação aberta igualar-se a pressão encontrada quando o sistema estava em operação e a vazão determinada por meio de um recipiente volumétrico graduado de 150,0 litros.

A largura do jato no lance em balanço, também chamado de padrão molhado, foi determinada em cada teste com o uso de uma fita métrica.

As seguintes variações de disposição dos emissores foram ensaiadas :

- . "Sprays" instalados em pendural a cerca de 1,0 m do solo;
- . "Sprays" instalados em pendural a cerca de 2,0 m do solo;
- . "Sprays" instalados em pendural a cerca de 3,0 m do solo;

- . "Sprays" instalados na linha lateral e voltados para baixo;
- . "Sprays" instalados na linha lateral e voltados para cima;
- . "Sprays" com anteparo rotativo instalados sobre a lateral.

A Figura 4 ilustra as posições estudadas.

Foram executados três ensaios por posição, sendo utilizadas as velocidades percentuais de 40, 60 e 80%, num total de 18 testes.

Figura 4 - Posições dos Emissores em Relação Superfície do Solo

3.1.2. Características elétrico-mecânicas

A característica eletro-mecânica mais importante do equipamento é a velocidade de rotação, isto porque existe uma relação entre esta e a lâmina aplicada.

Para a determinação da velocidade de rotação do sistema foram instaladas duas estacas na trajetória da última torre, distanciadas de 10,0 m, e o tempo para o equipamento percorrer esta distância determinado.

3.1.3. Variáveis climáticas

Valores instantâneos de velocidade e direção do vento foram obtidos, a cada 2,0 minutos, desde o início do teste. A evaporação total durante o ensaio foi determinada colocando-se 100 ml de água em um coletor adjacente.

3.2. Análise dos dados para determinação dos parâmetros de qualidade da irrigação

3.2.1. Determinação da uniformidade de aplicação de água

A uniformidade de aplicação de água do sistema foi determinada utilizando-se os conceitos sugeridos por CHRISTIANSEN (1942), WILCOX & SWAILES (1947), HEERMANN & HEIN (1968) e MAREK et alii (1986), através da aplicação das seguintes expressões :

$$CUC = 100 \left(1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n \cdot \bar{X}} \right) \dots \dots \dots (41)$$

$$U = 100 \left(1 - \frac{s}{\bar{X}} \right) \dots \dots \dots (42)$$

$$CUC_{HH} = 100 \left[1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n R_i X_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}}{\sum_{i=1}^n X_i R_i} \right] \dots \dots \dots (43)$$

$$C_{NSD} = 100 \left[1,0 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[R_i X_i - \frac{R_i \sum_{i=1}^n R_i X_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \right]^2}{n-1}}}{\frac{\sum_{i=1}^n R_i X_i}{n}} \right] \dots \dots \dots (44)$$

sendo :

—

X : Lâmina média coletada;

s : Desvio padrão;

R_i : Distância do centro de rotação ao i-ésimo coletor ;

X_i : Lâmina coletada no i-ésimo coletor ;

n : número total de coletores ;

- CUC : Coeficiente de Uniformidade de Christiansen;
- U : Coeficiente de Uniformidade de Wilcox & Swailes;
- CUC_{HK} : Coeficiente de Uniformidade de Christiansen,
segundo Heermann & Hein ;
- C_{uni} : Coeficiente de uniformidade estatístico segundo
Marek *et alii*.

3.2.2. Distribuição das freqüências acumuladas de lâminas

3.2.2.1. Valores observados

A seguinte sequência foi utilizada na obtenção das freqüências acumuladas de lâminas para posterior verificação dos ajustes propostos :

- i) As lâmina foram ordenadas de forma crescente, associadas com suas respectivas áreas de abrangência;
- ii) As áreas foram então adimensionalizadas através da seguinte expressão :

$$a_j = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^n A_j \dots \dots \dots (45)$$

sendo :

- a_j : j-ésimo valor de área adimensional;
- A_j : j-ésimo valor de área ;
- A : área total coberta pelo equipamento.

iii) Foram obtidos então os pares ordenados formados de lâmina x frequência acumulada (área).

3.2.2.2. Funções de distribuição de probabilidade

A distribuição gama incompleta trata-se de uma distribuição de frequência definida com base em um parâmetro de forma (α) e um de escala (β), pela seguinte expressão :

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \dots \dots \dots (46)$$

sendo :

$f(x)$: frequência de x;

x : variável aleatória, no nosso caso, a lâmina;

β : parâmetro de escala (depende da variabilidade da lâmina);

α : parâmetro de forma, dependente da magnitude da lâmina;

e : número de Nepper;

$\Gamma()$: função gama completa, definida por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\alpha-1} dx \dots \dots \dots (47)$$

para $x > 0$ e $\alpha > 0$

A eq. (47) tem solução através de séries e ajustes polinomiais.

ABRAMOWITZ & STEGUN (1972) recomendam a utilização da aproximação polinomial sugerida por HASTING JR (1972)¹ para $0 \leq k \leq 1$ conforme a expressão abaixo :

$$\Gamma(k+1) = 1 + b_1 k + b_2 k^2 + \dots + b_8 k^8 + \epsilon(k) \quad \dots \quad (48)$$

$$|\epsilon(k)| \leq 3 \cdot 10^{-7}$$

com,

$$b_1 = -0,577191652 ; \quad b_2 = -0,756704078 ;$$

$$b_3 = 0,988205891 ; \quad b_4 = 0,482199394 ;$$

$$b_5 = -0,897056937 ; \quad b_6 = -0,193527818 ;$$

$$b_7 = 0,918206857 ; \quad b_8 = 0,035868343 .$$

Assim, como $\alpha = k + 1$, a expressão acima abrange valores de $1 \leq \alpha \leq 2$

Para $\alpha > 2$ foi utilizada a aplicação continuada da seguinte propriedade da função gama :

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1) \cdot \Gamma(\alpha - 1) \quad (49)$$

Os parâmetros α e β foram estimados pela máxima verossimilhança, conforme THOM (1958) sendo:

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad \dots \quad (50)$$

com,

¹HASTINGS JR, C. Approximations for Digital Computers, Princeton Univ. Press, Princeto, n.j., 1955.

$$\hat{a} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}}{4A} \dots \dots \dots (51)$$

e,

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \ln(x_k) \dots \dots \dots (52)$$

sendo,

$\bar{x}$ = valor médio da lâmina aplicada;

x_k = k-ésimo valor da lâmina de irrigação;

n = número de coletores;

$\ln$ = operador do logaritmo neperiano;

$\hat{\alpha}$ = valor estimado do fator de forma, α ;

$\hat{\beta}$ = valor estimado do fator de escala, β .

A probabilidade de que o valor de lâmina não exceda um determinado valor x , $P(0 \leq X \leq x)$ é obtida por:

$$P(0 \leq X \leq x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x e^{-\frac{x}{\beta}} x^{\alpha-1} dx \dots \dots \dots (53)$$

Para solucionar a eq. (53) foi utilizado o método de integração numérica de SIMPSON, citado por THOMAS(1964) o qual baseia-se na aproximação quadrática de dois pontos consecutivos, resultando na seguinte forma geral:

$$a(x) = \frac{h}{3} (f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 4f(x_{n-1}) + f(x_n))$$

sendo :

$$h = (x_{\dots} - x_{\dots})/n$$

$x_{\dots}$: valor máximo assumido pela lâmina;

$x_{\dots}$: valor mínimo assumido pela lâmina;

n : número total subdivisões tomadas na integração;

$a(x)$: área que recebeu no máximo a lâmina x .

A área que recebeu no mínimo a lâmina x é representada por $A(x) = 1 - a(x)$.

Os valores estimados de probabilidades foram confrontados com os dados reais através da aplicação do teste não paramétrico de **KOLMOGOROV-SMIRNOV (CAMPOS, 1983)**.

Os componentes de volumes (armazenado, de déficit infiltrado e percolado) foram determinadas pela integração numérica dos valores de área para os limites de lâmina requerida.

Na obtenção dos parâmetros de qualidade da irrigação pelo modelo normal de distribuição também foram utilizados os métodos numéricos de integração acima descritos.

Os parâmetros de qualidade da irrigação foram determinados segundo os conceitos citados por **MATSURA (1987)** e **FRIZZONE (1992)** e definidos pelas equações (22) a (28).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Verificação das características operacionais

A velocidade de rotação do equipamento determinada em campo - V_c apresentou desvios em relação à velocidade registrada no relé percentual - V_r , sendo encontrados valores médios de 81,64 %; 63,48 % e 35,94 % para os respectivos valores esperados de 80 %; 60% e 40 % . A Figura 5 e Tabela 3 mostram a relação entre estas duas variáveis.

A equação que melhor ajusta os valores de velocidade percentual medidos em campo - V_c com os valores de lâmina média teve a forma potencial, conforme pode ser observado na Figura 6.

TABELA 3 - Dados gerais do ensaio

TEST	POSICÃO	VEL	V.MED	V.COR	TEMPO	LAM.
No.	EMISSION -	(%)	(m/h)	(%)	REVOL	APL.
	SOLO				(h:min)	(mm)
01	SP - 1 m	80	140,078	81,71	6:55	4,74
02	SP - 1 m	60	111,455	65,02	8:41	6,31
03	SP - 1 m	40	61,644	35,96	15:42	11,78
04	SP - 2 m	80	141,793	82,71	6:40	4,62
05	SP - 2 m	60	111,874	65,26	8:39	6,25
06	SP - 2 m	40	62,284	36,33	15:32	12,15
07	SP - 3 m	80	140,280	81,83	6:54	4,16
08	SP - 3 m	60	109,131	63,66	8:52	5,65
09	SP - 3 m	40	61,639	35,96	15:42	10,25
10	SP - SOB	80	140,625	82,02	6:53	4,61
11	SP - SOB	60	109,689	63,99	8:49	5,61
12	SP - SOB	40	62,051	36,20	15:36	9,78
13	SP -SOBR	80	136,622	79,70	7:05	4,07
14	SP -SOBR	60	108,335	63,20	8:56	4,91
15	SP -SOBR	40	60,990	35,58	15:52	10,34
16	ROT -SOBR	80	140,320	81,85	6:54	5,20
17	ROT -SOBR	60	102,398	59,73	9:27	6,04
18	ROT -SOBR	40	61,140	35,66	15:50	12,85

VELOCIDADE A 100 % - 171,4286 m/h

TEMPO PARA REVOLUÇÃO A 100 % - 5 h : 39 min

COMPRIMENTO ATÉ A ÚLTIMA TORRE - 154, 04 m

DISTANCIA DO CENTRO DE ROTAÇÃO AO PRIMEIRO COLETOR - 38,30m

SP - "SPRAY"

ROT - "ROTATORS"

Figura 05 - Velocidade de Campo x Relé

Figura 06 - Velocidade de Campo x Lâmina Média

A vazão do sistema foi determinada, registrando-se os valores de 61,558 e 60,128 m³/h, para o pivô instalado, respectivamente, com emissores tipo "sprays" com placa defletora fixa (testes 01 a 15) e rotativa ("rotators"-testes 16 a 18).

Os parâmetros climáticos de interesse, ou seja, velocidade e direção do vento e lâmina evaporada durante o teste, úteis para o estabelecimento de comparações entre um ensaio e outro, encontram-se expostos na Tabela 4. Vale ressaltar que os testes foram sempre conduzidos em situações onde a velocidade do vento nunca foi superior a 2,0 m/s e em períodos onde a demanda evaporativa da atmosfera era pequena, isto é, início da manhã e final da tarde.

As pressões de operação do sistema determinadas no centro de rotação e em pontos da linha lateral (após o regulador de pressão) estão mostradas na tabela 5. Observa-se que os valores máximos e mínimos de pressão determinados na saída dos emissores foram de 137 kPa (1,37 bar) e 167 kPa (1,67 bar). Sendo o valor esperado no dimensionamento de 140 kPa (1,40 bar), o que produz uma variação média de 10,71 %.

TABELA 4 - Parâmetros climáticos registrados nos testes

TESTE No.	VENTO		EVAPORAÇÃO (mm)
	VEL.MED(m/s)	DIREÇÃO	
01	0,621	E - SE	0,3
02	1,008	W	1,3
03	0,885	E - SE	1,2
04	0,850	E - SE	1,0
05	0,618	W - SW	1,0
06	0,848	E - SE	1,0
07	0,906	N - NE	1,4
08	0,909	N - NE	2,4
09	0,991	SW - W	2,6
10	0,994	NW - W	1,7
11	0,868	NW - N	0,5
12	0,591	NW - W	1,0
13	0,970	NW - W	0,8
14	0,891	N	1,9
15	0,875	SW - S	4,1
16	-	NE	0,1
17	0.02	E	0,9
18	0.152	E - SE	1.0

TABELA 5 - Valores de pressões de operação

DISTAN (m)	PRESSÃO (kPa)					
	a 1 m	a 2 m	a 3 m	sob	sobre	rotat
P.PIV	304	304	304	304	304	203
52,51	169	166	165	165	146	147
66,75	149	150	148	149	149	137
91,07	167	147	146	146	146	137
103,27	149	147	143	143	143	141
129,65	149	149	151	152	150	143
143,91	144	144	143	144	143	138
160,16	139	146	150	154	150	135

4.2. Posição e tipo dos emissores versus desempenho

Em irrigação por aspersão, espera-se que haja uma sobreposição dos jatos adjacentes de tal sorte que em todos os pontos da área irrigada seja encontrada uma só lâmina. Em pivô-central, há um aspecto complicador em relação à aspersão convencional, uma vez que o equipamento apresenta um movimento rotativo em torno de um ponto central, fazendo com que as áreas de abrangência de cada emissor sejam crescentes e o tempo de permanência do equipamento sobre um

ponto decrescente a medida que se distancia do centro de rotação.

Portanto, para que se tenha uma sobreposição perfeita do jato deve haver uma exata combinação da velocidade de movimentação do equipamento com a característica de aplicação de água do emissor ao longo da lateral. A redução no raio de molhamento do emissor acarreta prejuízos na sobreposição pretendida.

De fato isso foi verificado nos ensaios, a medida que se fez aumentar o comprimento do pendural, aproximando mais o emissor do solo e reduzindo o alcance do jato, foi registrado um decréscimo na uniformidade, sendo que para a velocidade de 40 % e considerando os "sprays" instalados a 1,0 m do solo como referência, foram encontradas as seguintes variações na uniformidade : 3,25; 4,50; 6,49; 2,44 e 5,75 %, respectivamente, para "sprays" instalados a 2,0 m; 3,0 m do solo; "sprays" sem pendural e voltados para baixo; "sprays" sem pendural e voltados para cima; "rotators" voltados para cima.

Com relação à velocidade de caminhamento, pôde-se constatar que em 66,67 % dos ensaios a máxima uniformidade de aplicação de água foi encontrada na velocidade de 40 % e em 33,33 % a 80 %. Ainda verificou-se que 16,67 % dos ensaios apresentaram menor uniformidade a

40% , 33,33 % na velocidade de 80 % e 50,00 % em 60 % de velocidade .

A lâmina aplicada apresentou uma tendência decrescente com a diminuição do comprimento do pendural, exceção feita aos emissores tipo "rotators", conforme pode ser observado na Tabela 3. Tomando o caso mais característico, a 60 % de velocidade, a variação da lâmina média aplicada em relação ao "spray" sobre a linha lateral foi de 14,26; 15,07; 27,29; e 28,51 % , respectivamente, para "spray" voltado para baixo sem pendural; "sprays" a 3,0; 2,0; e 1,0 m do solo.

Essa variação reflete o efeito do vento, provocando a deriva da água aplicada para além da área de teste, sendo este efeito mais pronunciado a medida que os emissores encontram-se mais distantes do solo.

O ensaio 15 (sprays sobre a linha lateral com equipamento a 40 % de velocidade) apresentou uma inversão desta tendência, sendo verificado um valor de lâmina média superior aos ensaios 12 ("spray" ligado à lateral e voltado para baixo) e 09 ("spray" com pendural de 1,0 m), embora o equipamento esteja a mesma velocidade, isto deve-se ao efeito da direção do vento que incidiu paralelamente às linhas de coletores, minimizando a deriva, conforme sugerem STEINER et alii (1982).

4.3. Taxa de aplicação versus posição e tipo do emissor

Verificou-se nos ensaios que, a medida que o emissor se afasta do solo, reduz-se a sua taxa de aplicação máxima e média, conforme pode ser observado na Tabela 6.

As taxas de aplicação médias e máximas no quarto vão apresentaram os seguintes valores: 0,840 e 1,90 mm/h; 0,575 e 1,2 mm/h; 0,569 e 1,1 mm/h; 0,595 e 1,4 mm/h; 0,620 e 1,4 mm/h; 0,267 e 0,6 mm/h, respectivamente nos "sprays" instalados a 1,0; 2,0 e 3,0 m; "sprays" sem pendural e voltados para baixo; para cima e "rotators" voltados para cima, mostrando uma tendência decrescente a medida que se afastou o emissor do solo.

A inversão na tendência anteriormente citada, verificada nos perfis 12 e 15 deve-se no primeiro caso à menor velocidade de vento verificada durante o ensaio (0,591 m/s contra 0,838 m/s em média nos ensaios com sprays) e no segundo caso ao sentido de deslocamento do vento (SW - S), ou seja, paralelo à linha de coletores e se saindo do ponto central de rotação para a extremidade do equipamento.

Os emissores com placa defletora rotativa (rotators) apresentaram um alcance do jato superior aos sprays para a mesma condição de operação (ensaio 18 e 15), determinando valores inferiores de taxas de aplicação máxima e média. Esta característica deve ser levada em consideração

na escolha de emissores em equipamentos dimensionados para operar em áreas que apresentam solos com baixas taxas de infiltração.

TABELA 6 - Valores de taxas de aplicação

ENSAIO No.	VÃO No.	Tx. DE APLICAÇÃO (mm/min)		LAMINA APLICADA (mm)	DIAMET. MOLHADO (m)
		MÉDIA	MÁXIMA		
03	2	0,436	0,8	11,0	08,46
	3	0,707	1,1	10,6	
	4	0,840	1,9	10,5	
06	2	0,300	0,8	7,3	10,65
	3	0,533	0,9	11,2	
	4	0,575	1,2	9,6	
09	2	0,300	0,7	7,1	11,53
	3	0,391	0,8	8,2	
	4	0,569	1,1	9,1	
12	2	0,352	0,8	9,6	12,00
	3	0,443	0,9	9,4	
	4	0,595	1,4	11,3	
15	2	0,324	0,6	7,2	12,05
	3	0,366	0,9	10,7	
	4	0,620	1,4	12,4	
18	2	0,143	0,3	9,0	18,90
	3	0,278	0,6	9,9	
	4	0,267	0,6	7,2	

4.4. Comparação entre metodologias para avaliar a uniformidade

Com relação aos métodos utilizados para a análise dos valores de lâminas precipitados a fim de se determinar a uniformidade de aplicação de água do sistema, pode ser visto pelos dados expostos na Tabela 7, que o coeficiente de uniformidade de **CHRISTIANSEN (1942)** modificado por **HEERMANN & HEIN (1968)** superestima os valores de uniformidade em relação ao modelo original em cerca de 1,77 a 6,93 %.

A mesma tendência é verificada ao se comparar o coeficiente de **WILCOX & SWAILES (1947)** modificado por **MAREK et alii (1986)** com a forma original, sendo verificadas variações de 0,16 a 5,47 %.

Estas variações são intrínsecas ao método ponderado, o qual estabelece pesos diferenciados para os coletores. Assim, em casos onde os valores de lâminas coletadas apresentam um incremento do início à extremidade do equipamento, a uniformidade tende a ser superior comparadas com os casos onde as lâminas são decrescentes.

Essa constatação conduz ao questionamento da utilidade do modelo ponderado na determinação da uniformidade de distribuição de água em pivô-central. Afinal, espera-se que em todos os pontos da área irrigada seja aplicada a mesma

TABELA 7 - Valores de uniformidade

ENS No.	CUC ¹ (%)		Δ (%)	U ² (%)		Δ (%)	CUC-U (%)	
	³ OR	⁴ MOD		OR	MOD		OR	MOD
01	82,9	86,7	4,5	81,6	83,41	2,11	1,5	3,86
02	83,7	86,8	3,7	82,4	82,87	0,56	1,5	4,61
03	85,4	89,1	4,3	84,8	86,81	2,26	0,6	2,57
04	85,9	89,4	4,0	85,9	86,13	0,24	0,0	3,68
05	85,2	87,6	2,8	81,2	81,47	0,33	4,7	7,06
06	88,2	90,7	2,9	88,6	88,31	0,43	0,5	2,72
07	90,3	92,9	2,8	91,7	90,40	1,44	1,5	2,74
08	86,2	89,5	3,8	85,9	86,68	0,89	0,3	3,23
09	89,2	91,6	2,7	88,5	88,67	0,15	0,8	3,27
10	87,0	88,6	1,7	83,0	80,57	2,97	4,6	9,07
11	87,4	90,0	2,9	87,6	86,08	1,78	0,2	4,39
12	90,9	93,4	2,7	91,4	91,30	0,16	0,5	2,27
13	87,2	90,4	3,3	86,2	86,01	0,22	1,2	4,90
14	81,6	87,3	6,9	79,1	83,52	5,47	3,0	4,37
15	87,5	90,5	3,5	85,8	86,52	0,78	1,8	4,46
16	91,1	93,0	3,1	90,8	90,26	0,59	0,7	2,96
17	90,9	93,6	3,3	90,9	89,73	1,36	0,4	4,15
18	90,3	93,1	3,1	90,8	89,18	1,82	0,5	4,29

¹ COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE CHRISTIANSEN² COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE WILCOX & SHILLS³ ORIGINAL⁴ MODIFICADO VIA PONDERAÇÃO

lâmina, não valores crescentes. Para compensar o fato de que o equipamento deve cobrir um área crescente com o incremento da distância ao centro de rotação, no dimensionamento, devem-se colocar emissores com espaçamentos decrescentes e com raios de alcance maiores à medida que se distancia deste centro de rotação.

Considerando-se a comparação entre os métodos para estimativa da uniformidade preconizados por **CHRISTIANSEN (1942)**, que considera a relação entre o desvio absoluto médio e a lâmina média e o método proposto por **WILCOX & SWAILES (1947)**, que considera o coeficiente de variação como estimativa da uniformidade, verificou-se que o segundo modelo mostrou-se mais sensível, especialmente para as formas modificadas quando a variação entre os valores de uniformidade verificada foi de 2,27 a 9,07 %. Estes dados comprovam a hipótese levantada por **MAREK et alii (1986)** de que a utilização do coeficiente de variação enfatiza os desvios maiores em relação à média, produzindo menores valores de coeficiente de uniformidade, sendo, assim, útil para localizar possíveis defeitos de dimensionamento ou detectar emissores obstruídos no equipamento.

Para o método original, as variações entre U e CUC apresentaram menor intensidade, sendo inclusive verificados casos onde a uniformidade foi superestimada pelo

uso do coeficiente de variação, como nos ensaios 04, 06, 07, 11, 12, 17 e 18.

4.5. Perfis de distribuição de água

Com o objetivo de relacionar as lâminas precipitadas com suas respectivas probabilidades de ocorrência para a determinação dos parâmetros úteis na avaliação da qualidade da irrigação, foram utilizadas as funções de distribuição de probabilidades acumuladas gama e normal.

A. Distribuição gama

O método de máxima verossimilhança citado por THOM (1958) para a determinação dos parâmetros de forma (α) e de escala (β), mostrou-se factível e simplificado.

Os valores de α variaram de 8,12 a 24,99, conforme pode ser observado na Tabela 8. Este parâmetro está inversamente relacionado com a assimetria da distribuição, sendo verificado que os perfis obtidos nas velocidades percentuais de 40 % apresentaram maiores valores, tendendo, portanto a uma distribuição mais simétrica, como a normal.

A integral da função de densidade de um valor arbitrário, x , ao infinito revela a probabilidade de aquele valor ser o mínimo na distribuição e, portanto, no caso da

distribuição de água, representa a fração da área que recebeu água em excesso.

TABELA 8 - Parametros estatísticos das distribuições

Ensaio	α	β	$\Gamma(\alpha)$	Média	D.Padr	C.V.
01	8,121	0,549	6,44E+03	4,457	0,991	0,222
04	11,651	0,394	1,71E+07	4,591	1,109	0,241
07	15,353	0,262	2,25E+11	4,029	0,716	0,178
10	19,220	0,229	1,22E+16	4,398	0,806	0,183
13	17,501	0,225	8,60E+13	3,946	0,785	0,199
16	21,535	0,234	1,20E+19	5,032	0,852	0,169
02	13,549	0,449	1,90E+09	6,081	1,416	0,233
05	13,272	0,462	9,60E+08	6,135	1,383	0,225
08	11,440	0,477	1,03E+07	5,458	1,195	0,219
11	12,360	0,439	9,67E+07	5,429	1,102	0,203
14	11,236	0,424	6,34E+06	4,763	1,218	0,256
17	19,937	0,294	1,00E+17	5,852	1,013	0,173
03	15,566	0,758	4,00E+11	11,795	2,173	0,184
06	12,014	0,950	4,13E+07	11,413	2,466	0,216
09	24,992	0,400	6,00E+23	9,994	1,680	0,168
12	30,205	0,316	1,80E+31	9,539	1,399	0,147
15	25,960	0,390	1,40E+25	10,121	1,781	0,176
18	19,239	0,647	1,30E+16	12,445	2,176	0,175

B. Estimativa do melhor ajuste

Para verificar se as distribuições normal e gama ajustam com precisão os dados observados de probabilidade, foi utilizado o teste não paramétrico de **KOLMOGOROV-SMIRNOV**.

Neste teste, os valores máximos de desvios admitidos para as probabilidades estimadas em relação aos valores reais, considerando-se um número de amostra de 44 elementos e os níveis máximos de significância de 0,8; 0,9; 0,95; 0,98 e 0,99 são, respectivamente, 0,158; 0,180; 0,200; 0,224 e 0,221.

Considerando o nível máximo de significância de 95%, pôde-se constatar que os ensaios de número 01 e 18 não se ajustaram aos modelos propostos; 03, 07, 08, 14, 16 e 17 não se ajustaram à distribuição gama e sim à distribuição normal, como os demais (Tabela 9).

Observou-se ainda que mesmo nos ensaios onde é indiferente a utilização de uma ou outra função de distribuição, o modelo normal apresentou menores desvios, levando à conclusão de que, em distribuições de água via pivô-central, que apresentam coeficiente de variação inferiores a 25,6 %, a distribuição normal deve ser preferível a outras na determinação das áreas de déficit e excesso de água.

As Figuras 7 a 24, em anexo, apresentam o confronto entre as distribuições acumuladas gama, normal e os valores observados.

TABELA 9 - Desvios máximos observados

ENSAIO	DESVIO		AJUSTE	
	GAMA	NORMAL	GAMA	NORMAL
1	0,305	0,262	N	N
2	0,164	0,150	S	S
3	0,220	0,088	N	S
4	0,142	0,121	S	S
5	0,134	0,105	S	S
6	0,194	0,115	S	S
7	0,207	0,137	N	S
8	0,227	0,144	N	S
9	0,161	0,124	S	S
10	0,159	0,145	S	S
11	0,148	0,107	S	S
12	0,164	0,132	S	S
13	0,172	0,144	S	S
14	0,220	0,178	N	S
15	0,194	0,168	S	S
16	0,239	0,177	N	S
17	0,231	0,182	N	S
18	0,236	0,202	N	N

N = Não ajustou S = Ajustou

4.6. Determinação dos parâmetros de qualidade de irrigação

Para a distribuição gama, os volumes requeridos para abastecer a zona radicular, de deficit, excesso, total infiltrado e disponível foram obtidos via integração numérica da função de distribuição de probabilidades.

Com estes valores foram então obtidos os parâmetros que atestam a qualidade da irrigação mostrados na Tabelas 10 e 11 para o ajuste com as função gama e normal, considerando os valores de lâminas adimensionais requeridas de 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; e 1,4.

A escolha da lâmina de manejo deve basear-se no equilíbrio entre as eficiências de distribuição, armazenamento e aplicação. Seguindo as faixas de valores sugeridas por HART et alii (1978), as lâminas adimensionais que proporcionam irrigações em níveis excelentes são: 1,00 para os ensaios de número 01 e 18 e, 1,20 para os demais, considerando-se o ajuste pela curva de Gauss; 1,20 para os ensaios 07, 10, 13, 17, 09 e 12 e, 1,00 para os demais, considerando a função gama.

A eficiência de aplicação em potencial fornece uma estimativa de outras perdas que não a percolação profunda, sendo útil para os nossos propósitos, pois, os termos envolvidos neste parâmetro são a evaporação do jato de água e a deriva causada pelo vento.

Tendo os ensaios sido conduzidos em horários onde a demanda evaporativa não apresentou grandes variações (início da manhã e final da tarde), pode-se afirmar que a variação entre as eficiências de aplicação em potencial de um ensaio para outro deve-se basicamente ao efeito do vento.

Observaram-se os seguintes valores médios de Eap: 93,48; 92,52; 83,77; 83,30 e 79,64 % considerando-se o ajuste pela função gama e, 97,28; 96,06; 82,96; 84,84 e 78,84 % considerando-se o ajuste pela distribuição normal, os quais correspondem aos ensaios com emissores com placa defletora fixa, instalados a 1,0 m; 2,0 m; 3,0 m do solo; montados diretamente na linha do pivô e voltado para baixo e, na condição anterior mas voltados para cima. Isto permite concluir que à medida que o emissor se afasta do solo aumentam as perdas de água devido ao vento, devendo estes ser instalados a alturas inferiores a 2,0 m do solo.

O ensaio 01 e aqueles com "rotators" não foram considerados nesta análise pois o primeiro não apresentou ajuste satisfatório por nenhuma das funções estudadas e os últimos foram conduzidos em condições de vento praticamente nulo.

O efeito da direção do vento foi verificado, quando o ensaio número 15, conduzido com vento paralelo à linha do pivô, apresentou Eap superior ao esperado.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em razão do que foi discutido podem-se tirar as seguintes conclusões :

A altura do emissor em relação ao solo exerce influência nas perdas de água devidas ao vento, sendo a grandeza destas perdas diretamente proporcional à distância que separa o emissor do solo.

A uniformidade tendeu a reduzir-se com a aproximação dos emissores da superfície do solo, isto porque o alcance do jato decresce, sendo a sobreposição prejudicada.

As taxas de aplicação máxima e média tendem a elevar-se com a proximidade do solo, predispondo a ocorrência de escoamento superficial para equipamentos instalados sobre solos com capacidade de infiltração reduzida.

Recomenda-se, para a situação estudada, a instalação dos emissores a 1,0 ou 2,0m do solo, nos casos onde a cultura instalada permitir, isto em função da redução nas perdas e considerando que o solo apresenta alta capacidade de infiltração.

Com relação aos métodos utilizados na determinação da uniformidade de distribuição de água pelo equipamento, pode-se concluir que o uso do coeficiente de variação apresenta maior sensibilidade que o desvio médio absoluto, devendo este último ser preterido.

O ajuste da função de distribuição de probabilidades pela curva normal, dentro da faixa de coeficiente de variação estudada ($CV < 0,256$) apresentou menor desvio em relação à probabilidade acumulada observada, devendo ser recomendado. No entanto, comparando os valores de eficiência, nota-se existem desvios nos parâmetros de qualidade da irrigação devido a um ajuste impreciso. Daí porque recomenda-se o confronto entre estas duas funções para perfis que apresentam coeficientes de variação superiores e portanto mais assimétricas, como no caso da irrigação por aspersão convencional.

Finalmente, ressalta-se que seria altamente recomendável que todo equipamento tipo pivô-central ao ser comercializado, diretamente pelo fabricante e/ou revendedor, devesse ser analisado em sua performance antes do proprietário assinar a nota de entrega, sendo esta análise realizada por instituições oficiais que imitariam um "laudo técnico" sobre o equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOWITZ, M & STEGUN, I.E. **Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables**, 3.ed. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1972. 1046p. (Applied Mathematics Series 55).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Sistema de irrigação por aspersão pivô central-caracterização de desempenho/método de ensaio. Projeto de norma 12:02.08-005.** Rio de Janeiro, 1985.

BENAMI, A. **Irrigation engineering.** Faculty of Agricultural Engineering Technicon - Israel Institute of Technology, 1984.

BRASIL. Ministério da irrigação **Resenha setorial da irrigação no Brasil.** Brasília, 1989. 87p.

CAMPOS, H. de **Estatística experimental não-paramétrica.** 4.ed. Piracicaba, ESALQ, 1983. 349p.

CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by Sprinkling. 2.ed.
Berkley, University of California, 1972. 124p.
(California Agricultural Experimental Station Bulletin, _____
670).

DILLON JR, R.C.; HILER, E.A.; VITTETOE, G. Center-pivot
sprinkler design based on intake characteristics. St
Joseph, 1971. 27p. (ASAE paper, 71-759).

FAZAL, H.C. Nonuniform sprinkler irrigation application
efficiency, Journal of Irrigation and Drainage Division,
New York, 105(IR2):165-178, June 1978.

FRIZZONE, J.A. Irrigação por aspersão : uniformidade e
eficiência. Piracicaba, ESALQ/Engenharia Rural, 1992.
Série Didática # 3.

HART, W.E. Overhead irrigation patters parameters,
Transactions of the ASAE, St. Joseph, 42(7):354-355,
July 1961.

HART, W.E. & HEERMANN, D.F. Evaluating water distributions
of sprinkler irrigation systems. Fort Collins, Colorado
State University, 1976. 42 p. (Colorado Experimental
Station Bulletin, 128).

- HART, W.E. & REYNOLDS, W.N. Analytical design of sprinkler system, *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 8(1):83-5, 89, Jan/Fev 1965.
- HART, W.E.; PERI, G.; SKOGERBOE, G.V. Irrigation performance: an evaluation, *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, 105(IR3):275-288, November, 1978.
- HEERMANN, D.F. & HEIN, P.R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 11(1):11-4, 1968.
- HOWELL, D.T. Non-uniformity and sprinkler application efficiency, *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, 90(IR3):41-53, sept. 1964.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Apoio tecnológico à agricultura irrigada no município de Guaíra-SP. Relatório no. 23966, IPT, São Paulo, 1985. vol. 2.
- JAMES, L.G.; EVANS, R.G.; THOMPSON, R.G. & FELLOWS, R.L. A comparasion of low pressure center pivot irrigation systems. St Joseph, 1982 14p. (ASAE paper,82-2004).

KARMELI, D. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression, *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 87(2):682-686, Mar./Apr. 1978.

KRUSE D., ed. Describing irrigation efficiency and uniformity, *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, 104(IR1):35-41, Nov. 1977.

LONGLEY, T.S.; GARVIN, P.C. & STARK, J.C. Wind drift effects on evapotranspiration under low pressure sprinklers. St Joseph, 1983. 12p. (ASAE paper, 83-2590).

MAREK, T.H.; UNDERSANDER, D.J.; EBELING, L.L. An areal-weighted uniformity coefficient for center pivot irrigation system. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 29(6): 1665-7, Nov/Dec. 1986.

MATSURA, E.E. Eficiência de irrigação e uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação por aspersão. Piracicaba, 1987. 124 p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP

MEYER, P.L. Probabilidades ; aplicações à estatística.

3.ed.. Rio de Janeiro, LTC. 1983. 426p.

NORUM, E.M. A method of evaluating adequacy and efficiency of overhead irrigation systems, **Transactions of the ASAE**, St Joseph, 26(2):218-220, Mar./Apr. 1966.

PAIR, C.H. Water distribution under sprinkler irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 11(5):648-51, 1968.

PISKOUNOV, N. Cálculo diferencial e integral. 7.ed. Porto, Ed Lopes da Silva, 1984. V.2, 457p.

STEINER, J.L.; KANEMASU, E.T. & CLARK, R.N. Spray losses and partitioning of water under a center pivot sprinkler system, **ASAE Paper (82-2006)**, June 1982.

THOMAS, G.B.Jr. Cálculo. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1968. v.2, 494 p.

THOM, H.C.S. A note on the gamma distribution, **Monthly Weather Review**, Washington, 86(4):117-122, Apr. 1958.

von BERNUTH, R.D. & GILLEY, J.R. Evaluation of center pivot applications packages considering droplet induced infiltration reduction, St. Joseph, 1983. p. (ASAE paper, 83-2516).

von BERNUTH, R.D. Effect of trajectory angle on performance of sprinklers in wind. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, 114(4):579-87, Nov. 1988.

VORIES, E.D. & BERNUTH, R.D. von Simulation of wind effects on sprinkler uniformity, St. Joseph, 1985. 41p. (ASAE paper, 85-2063).

WALKER, W.R. Explicit sprinkler irrigation uniformity: Efficiency model. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, 105(IR2):129-136, June 1979.

WILCOX, J.C. & SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. Scientific Agriculture, Ottawa, 27(11):565-83, Nov. 1947.

APÊNDICE

TABELA 10 e 11

FIGURA - FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE ACUMULADA

TABELA 10 - Parâmetros de qualidade obtidos pela distribuição gama

		LAMINAS ADIMENSIONAIS						
ENSAIO		0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40
01	Ed	20.07	40.03	59.03	75.14	86.52	93.48	97.19
	Dp	69.13	51.87	35.45	21.51	11.66	5.64	2.43
	Es	99.71	99.47	97.74	93.06	85.77	77.25	68.86
	Ea	17.37	34.65	51.07	65.01	74.86	80.88	84.08
04	Ed	20.09	40.15	59.49	76.49	88.52	95.27	98.37
	Dp	74.21	55.58	37.62	21.83	10.66	4.39	1.52
	Es	99.85	99.79	98.93	95.32	88.20	79.08	69.96
	Ea	18.65	37.28	55.24	71.03	82.19	88.47	91.34
07	Ed	20.13	40.01	59.87	77.41	89.93	96.40	98.97
	Dp	63.04	47.35	31.68	17.83	7.95	2.84	0.81
	Es	100.0	99.99	99.54	96.73	89.79	80.31	70.61
	Ea	15.89	31.58	47.25	61.10	70.99	76.09	78.12
10	Ed	20.03	40.06	59.95	78.15	91.00	97.26	99.37
	Dp	67.07	51.76	34.80	18.88	7.77	2.37	0.54
	Es	100.0	100.00	99.77	97.54	90.86	80.93	70.87
	Ea	17.30	34.61	51.79	67.51	78.62	84.02	85.85
13	Ed	20.04	40.09	59.95	77.93	90.60	96.95	99.21
	Dp	60.21	45.12	30.16	16.62	7.08	2.30	0.59
	Es	99.99	99.99	99.68	97.19	90.39	80.60	70.83
	Ea	15.10	30.19	45.15	58.69	68.23	73.01	74.72
16	Ed	20.10	39.99	60.00	78.49	91.47	97.64	99.52
	Dp	79.90	60.01	40.00	21.51	8.53	2.36	0.48
	Es	100.0	100.0	100.0	100.00	93.93	83.49	73.02
	Ea	20.10	39.99	60.00	78.49	91.47	97.63	99.52
02	Ed	20.34	40.52	60.59	78.19	90.40	96.89	99.38
	Dp	74.46	55.60	36.83	20.38	8.97	2.91	0.58
	Es	100.0	100.00	99.55	96.28	89.16	79.59	70.03
	Ea	19.02	37.88	56.64	73.09	84.51	90.57	92.90
05	Ed	20.41	40.65	60.66	78.23	90.49	96.91	99.42
	Dp	73.04	54.47	36.10	19.98	8.73	2.84	0.53
	Es	97.35	97.32	96.69	93.45	86.44	77.23	67.88
	Ea	18.74	37.31	55.68	71.80	83.05	88.94	91.25
08	Ed	20.17	40.31	59.92	77.07	89.02	95.71	98.71
	Dp	65.27	48.80	32.77	18.75	8.97	3.50	1.06
	Es	99.10	99.04	98.15	94.45	87.32	78.26	69.19
	Ea	16.49	32.96	48.99	63.01	72.79	78.25	80.70

cont ...

LÂMINAS ADIMENSIONAIS								
EMSAID		0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
11	Ed	20,23	40,26	60,01	77,11	89,28	95,95	98,81
	Dp	68,55	49,10	32,86	18,81	8,81	3,33	0,98
	Es	99,34	99,30	98,53	95,11	88,01	78,77	69,59
	Ea	16,62	33,08	49,31	63,37	73,37	78,85	81,20
14	Ed	20,01	40,21	59,64	76,45	88,37	95,18	98,30
	Dp	57,44	42,93	28,98	16,91	8,35	3,46	1,22
	Es	99,83	99,76	98,82	95,10	87,98	78,86	69,84
	Ea	14,37	28,87	42,82	54,90	63,45	68,35	70,58
17	Ed	19,98	39,96	59,94	78,40	91,35	97,56	99,56
	Dp	68,72	51,56	34,41	18,55	7,43	2,09	0,38
	Es	100,00	100,00	100,00	98,11	91,45	81,39	71,19
	Ea	17,16	34,31	51,47	67,33	78,45	83,78	85,50
03	Ed	20,44	40,88	61,12	79,06	88,46	97,75	99,78
	Dp	76,74	57,02	37,50	20,20	11,13	2,17	0,21
	Es	96,91	96,90	96,58	93,70	83,87	77,29	67,62
	Ea	19,72	39,43	58,95	76,26	85,33	94,29	96,24
06	Ed	20,54	41,16	61,18	78,55	90,64	97,08	99,54
	Dp	74,01	54,81	36,16	19,98	8,72	2,72	0,42
	Es	96,32	96,28	95,47	91,97	84,91	75,75	66,59
	Ea	19,14	38,34	56,99	73,17	84,43	90,42	92,72
09	Ed	20,10	40,20	60,25	78,97	92,38	98,31	99,83
	Dp	68,54	51,30	34,10	18,04	6,54	1,45	0,14
	Es	100,00	100,00	99,91	98,33	92,00	81,58	71,00
	Ea	17,24	34,48	51,68	67,74	79,24	84,33	85,64
12	Ed	20,03	40,05	59,95	79,02	92,78	98,51	99,81
	Dp	65,09	48,79	32,59	17,07	5,88	1,21	0,15
	Es	98,34	98,34	98,31	97,14	91,22	80,70	70,08
	Ea	16,30	32,60	48,79	64,31	75,51	80,17	81,23
15	Ed	19,98	40,05	59,99	78,84	92,24	98,16	99,73
	Dp	67,20	50,34	33,60	17,77	6,51	1,54	0,23
	Es	97,35	97,35	97,28	95,81	89,72	79,59	69,28
	Ea	16,78	33,63	50,37	66,21	77,46	82,43	83,74
18	Ed	20,45	40,90	61,21	79,74	92,58	98,48	99,50
	Dp	79,55	59,10	38,79	20,26	7,42	1,52	0,80
	Es	95,61	95,61	95,39	93,19	86,62	76,78	66,80
	Ea	20,45	40,90	61,21	79,74	92,57	98,48	99,97

TABELA 11 - Parâmetros de qualidade da irrigação para distribuição normal

		LAMINAS ADIMENSIONAIS						
ENSAIO		0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40
01	Ed	21.81	43.56	64.68	83.02	94.49	98.96	99.90
	Dp	62.42	45.06	28.20	13.56	4.40	0.83	0.08
	Es	99.99	99.84	98.84	94.87	86.43	73.46	63.31
	Ea	17.41	34.78	51.64	66.28	75.44	79.00	79.76
04	Ed	19.97	39.90	59.24	79.18	90.23	97.19	99.50
	Dp	74.83	56.20	38.11	19.47	9.14	2.63	0.47
	Es	99.99	99.88	99.21	99.37	90.53	81.23	71.27
	Ea	18.68	37.31	53.40	74.04	84.37	90.88	93.04
07	Ed	20.08	39.91	59.92	78.69	92.87	98.81	99.92
	Dp	63.24	47.55	31.72	16.86	5.64	0.94	0.06
	Es	100.0	100.0	99.88	98.58	92.96	82.52	71.47
	Ea	15.89	31.58	47.41	62.27	73.49	78.19	79.07
10	Ed	19.60	39.19	58.58	76.63	90.40	97.50	99.64
	Dp	70.97	53.68	36.57	20.65	6.48	2.20	0.32
	Es	100.0	99.96	99.61	97.74	92.23	82.90	72.61
	Ea	17.30	34.60	51.71	67.65	79.80	86.08	87.96
13	Ed	19.99	39.98	59.82	78.34	92.06	98.36	99.83
	Dp	60.41	45.32	30.34	16.35	6.00	1.24	0.13
	Es	100.0	99.98	99.73	97.96	92.09	81.99	71.46
	Ea	15.10	30.19	45.17	59.15	69.51	74.27	75.38
16	Ed	20.03	39.91	59.91	79.03	93.19	99.01	99.95
	Dp	77.95	58.60	39.09	20.45	6.64	0.97	0.05
	Es	100.0	100.0	99.92	98.77	93.31	82.56	71.50
	Ea	19.55	38.91	58.42	77.06	90.87	96.54	97.46
02	Ed	20.03	39.91	59.60	77.56	90.76	97.59	99.67
	Dp	75.59	56.82	38.20	21.22	8.73	2.28	0.31
	Es	99.70	99.62	99.04	96.60	90.53	81.09	71.04
	Ea	18.96	37.73	56.55	73.33	85.82	92.27	94.24
05	Ed	20.04	39.88	59.61	77.70	91.09	97.76	99.73
	Dp	76.61	57.59	38.69	21.36	8.53	2.15	0.26
	Es	99.73	99.67	99.18	96.89	90.83	81.32	71.08
	Ea	19.19	38.21	57.11	74.44	87.27	93.63	95.34
08	Ed	19.72	39.81	59.47	77.78	91.18	97.82	99.70
	Dp	66.90	50.28	33.86	18.59	7.37	1.82	0.25
	Es	99.99	99.94	99.53	97.36	91.38	81.72	71.41
	Ea	16.64	33.26	49.68	64.95	76.17	81.72	83.29

cont ...

LAMINAS ADIMENSIONAIS								
ENBAID		0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40
11	Ed	20.06	39.92	59.81	78.15	91.87	98.26	99.81
	Dp	66.69	50.12	33.53	18.23	6.78	1.45	0.16
	Es	100.0	99.98	99.69	97.85	91.94	81.90	71.37
	Ea	16.73	33.31	49.89	65.20	76.64	81.97	83.27
14	Ed	19.92	39.98	59.35	76.77	89.73	96.83	99.35
	Dp	57.85	43.36	29.37	16.78	7.42	2.29	0.47
	Es	99.97	99.80	98.93	96.07	89.88	80.71	71.02
	Ea	14.39	28.88	42.87	55.46	64.82	69.95	71.77
17	Ed	19.98	39.95	59.87	78.86	93.04	98.92	99.94
	Dp	60.72	51.57	34.46	18.16	5.98	0.93	0.05
	Es	100.0	99.99	99.90	98.68	93.14	82.53	71.46
	Ea	17.16	34.31	51.42	67.72	79.90	84.95	85.83
03	Ed	20.03	40.05	59.98	78.80	92.75	98.77	99.95
	Dp	81.08	60.78	40.58	21.50	7.35	1.25	0.06
	Es	99.78	99.77	99.62	98.16	92.43	82.08	71.19
	Ea	20.30	40.60	60.81	79.89	94.04	100	100
06	Ed	20.02	40.10	59.87	78.09	91.54	98.09	99.82
	Dp	79.08	59.22	39.68	21.67	8.36	1.89	0.18
	Es	99.61	99.57	99.16	97.04	91.03	81.23	70.87
	Ea	19.79	39.65	59.19	77.20	90.51	96.98	98.69
09	Ed	20.00	40.01	59.96	78.96	93.25	99.03	99.95
	Dp	68.96	51.72	34.51	18.14	5.82	0.84	0.04
	Es	100.0	100.0	99.92	98.81	93.33	82.58	71.43
	Ea	17.24	34.48	51.69	68.06	80.39	85.36	86.16
12	Ed	20.01	40.02	59.92	79.37	94.13	99.42	99.99
	Dp	66.24	49.67	33.20	17.09	4.86	0.48	0.01
	Es	100.0	100.0	99.98	99.28	94.17	82.87	71.43
	Ea	16.57	33.14	49.62	65.73	77.95	82.33	82.80
15	Ed	19.95	40.00	59.88	78.87	92.94	98.87	99.93
	Dp	69.15	51.83	34.66	18.25	6.09	0.98	0.06
	Es	100.0	100.0	99.88	98.60	93.01	82.46	71.41
	Ea	17.23	34.55	51.72	68.13	80.30	85.40	86.32
18	Ed	20.06	40.11	60.10	79.11	93.20	99.05	99.99
	Dp	84.80	63.53	42.32	22.15	7.21	1.01	0.01
	Es	99.45	99.45	99.34	98.08	92.51	81.92	70.87
	Ea	21.27	42.55	63.75	83.92	98.87	100.0	100.0