ESTUDO DAS DISTRIBUIÇÕES DE FREQUÊNCIA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL
PARA FINS DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

JOÃO CARLOS GURY SAAD
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. KLAUS REICHARDT

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

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Junho - 1990

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

Saad, João Carlos Cury

S111e Estudo das distribuições de frequência da evapotranspiração de referência e da precipitação pluviométral para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação. Piracicaba, 1990.

124p

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Evapotranspiração - Frequência - Distribuição
2. Precipitação (meteorologia) - Frequência - Distribuição
3. Irrigação - Sistema - Dimensionamento I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

CDD 631.7

ESTUDO DAS DISTRIBUIÇÕES DE FREQUENCIA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERENCIA E DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL
PARA FINS DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

JOÃO CARLOS GURY SAAD

Aprovado em: 06.08.1990

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Klaus Reichardt

ESALQ/USP

Prof. Dr. José Antonio Frizzone

ESALQ/USP

Prof. Dr. Antonio Roberto Pereira

ESALQ/USP

Prof. Dr. Klaus Reichardt

Orientador

OFEREÇO aos meus pais,

NELSON e JANETE,

e aos meus irmãos,

JORGE ANTONIO, LUIZ HENRIQUE,

JOSE ROBERTO e MARTA CRISTINA,

a quem só DEUS sabe o quanto devo e amo.

AGRADEÇO ao Prof. Dr. EDMAR JOSE SCALOPPI

pela orientação, incentivo,

exemplo e, acima de tudo, pela

valiosa amizade.

DEDICO à minha querida noiva, BEATRIZ,

pelo precioso apoio e por tudo

que ela representa para mim.

HINO A CARIDADE

Ainda que falasse línguas,
as dos homens e as dos anjos,
se eu não tivesse a caridade,
seria como um bronze que soa
ou como um címbalo que tine.
Ainda que eu tivesse o dom da profecia,
o conhecimento de todos os mistérios
e de toda a ciência,
ainda que eu tivesse toda a fé,
a ponto de transportar montanhas,
se não tivesse a caridade,
eu nada seria.

.....

A caridade jamais passará.
Quanto às profecias, desaparecerão.
Quanto às línguas, cessarão.
Quanto à ciência, também desaparecerá.
Pois o nosso conhecimento é limitado,
e limitada é a nossa profecia.
Mas, quando vier a perfeição,
o que é limitado desaparecerá.

.....

Agora vemos em espelho
e de maneira confusa,
mas, depois, veremos face a face.
Agora meu conhecimento é limitado,
mas, depois, conhecerei como sou conhecido.
Agora, portanto, permanecem a fé,
esperança, caridade,
estas três coisas.
A maior delas, porém, é a caridade.

AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO

- a *DEUS*, pela fé, perseverança, saúde e por todas as graças concedidas durante o curso;
- ao *Prof. Dr. Klaus Reichardt*, pela orientação e pelo total apoio e confiança depositados em meu trabalho;
- ao *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq*, pelo auxílio financeiro através de bolsa de estudos;
- à *Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP*, pela acolhida e assistência dispensados;
- ao *Departamento de Engenharia Rural e à Coordenação do curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem*, pela oportunidade e apoio concedidos;

- ao *Prof. Dr. Jose Antonio Frizzone* pela amizade e pelas valiosas sugestões, as quais muito contribuíram para este trabalho;
- ao *Prof. Dr. Antonio Roberto Pereira* pela participação na comissão julgadora;
- ao *Departamento de Fisica e Meteorologia da ESALQ/USP*, que gentilmente forneceu os dados meteorológicos utilizados neste trabalho;
- ao amigo *Mauricio Dutra Zanotto* cuja convivência me possibilitou crescer muito;
- à bibliotecária *Katia M. P. de Andrade* pela revisão das referências bibliográficas;
- à *Prof. Mirva Curi* pela revisão gramatical do texto;
- aos *professores, colegas de curso e funcionários do Departamento de Engenharia Rural* pelas sugestões e convívio amigo;
- a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xxii
RESUMO	xxix
SUMMARY	xxxi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Evapotranspiração de referência	4
2.1.1. Considerações gerais	4
2.1.2. Seleção do método para estimativa da evapotranspiração de referência	6
2.1.3. Método de Penman	7
2.1.4. Distribuição de frequência da evapo- transpiração	8
2.2. Precipitação pluvial provável ou dependente	11
2.2.1. Considerações gerais	11
2.2.2. Distribuição de frequência da preci- pitação pluvial	13
2.3. Modelo matemático para dimensionamento de de sistemas de irrigação	18

	Página
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Descrição geral	21
3.2. Período utilizado	22
3.3. Parâmetros meteorológicos utilizados	24
3.4. Estimativa da evapotranspiração de referên- cia	24
3.4.1. Descrição da versão do método de Penman utilizado	25
3.4.1.1. Estimativa de Δ	26
3.4.1.2. Estimativa de γ	27
3.4.1.3. Estimativa de e_d e de e_a	28
3.4.1.4. Estimativa da radiação lí- quida (R_n)	28
3.4.1.5. Estimativa do termo de transferência aerodinâmica	30
3.5. Estimativa da distribuição de frequência da evapotranspiração de referência	31
3.6. Estimativa da distribuição de frequência da precipitação pluvial	36
3.7. Teste de Kolmogorov-Smirnov	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1. Evapotranspiração de referência	42
4.1.1. Evapotranspiração de referência para o mês de março	45
4.1.2. Evapotranspiração de referência para o mês de setembro	59

	Página
4.2. Precipitação pluvial	79
4.2.1. Precipitação pluvial para o mês de março	79
4.2.2. Precipitação pluvial para o mês de setembro	92
5. CONCLUSÕES	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

LISTA DE FIGURAS

Página

- Figura 1. Função densidade da distribuição Beta aplicada aos dados de evapotranspiração para a quarta pentada do mês de março .. 51
- Figura 2. Evapotranspiração para os diferentes níveis de probabilidade obtida através da distribuição Beta, e evapotranspiração observada para a quarta pentada de março 60
- Figura 3. Evapotranspiração para os diferentes níveis de probabilidade obtida através da distribuição Beta, e evapotranspiração observada para a primeira quinzena de março 61
- Figura 4. Função densidade da distribuição Beta aplicada à evapotranspiração para a quarta pentada do mês de setembro 69

Figura 5. Evapotranspiração para os diferentes níveis de probabilidade obtida através da distribuição Beta, e evapotranspiração observada para a quarta pentada de setembro	75
Figura 6. Evapotranspiração para os diferentes níveis de probabilidade obtida através da distribuição Beta, e evapotranspiração para a primeira quinzena do mês de setembro	76
Figura 7. Precipitação pluvial dependente obtida através da distribuição Mista, e precipitação observada para a quarta pentada do mês de março	93
Figura 8. Precipitação pluvial dependente obtida através da distribuição Mista, e precipitação observada para a primeira quinzena do mês de março	94
Figura 9. Precipitação pluvial dependente obtida através da distribuição Mista, e precipitação observada para a quarta pentada do mês de setembro	106

Figura 10. Precipitação pluvial dependente obtida através da distribuição Mista, e precipitação observada para a primeira quinzena do mês de setembro	107
Figura 11. Função densidade da distribuição Gama utilizada na distribuição Mista aplicada aos dados de precipitação da primeira quinzena do mês de março	108
Figura 12. Função densidade da distribuição Gama utilizada na distribuição Mista aplicada aos dados de precipitação da primeira quinzena do mês de setembro	109
Figura 13. Esquema mostrando o balanço entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade e a precipitação ao nível de 75% de probabilidade, visando a estimativa da exigência em água para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação	110

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Valores de $\Gamma(\alpha)$ para $1 \leq \alpha \leq 2$	15
Tabela 2. Valores dos coeficientes de assimetria e curtose para os dados de evapotranspiração do mês de março, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias	43
Tabela 3. Valores dos coeficientes de assimetria e curtose para os dados de evapotranspiração do mês de setembro, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias	44
Tabela 4. Valores da evapotranspiração de referência para as pentadas do mês de março, para um período de 30 anos	46

Tabela 5. Valores da evapotranspiração de referência para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, para um intervalo de 30 anos	47
Tabela 6. Parâmetros estatísticos referentes aos dados de evapotranspiração do mês de março, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias, de um intervalo de 30 anos	48
Tabela 7. Parâmetros p e q da distribuição Beta para os dados de evapotranspiração do mês de março, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias	50
Tabela 8. Evapotranspiração de referência calculada através da distribuição Beta para as pentadas do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência	52
Tabela 9. Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Beta para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência	53

Tabela 10. Relação entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade em um determinado período e a evapotranspiração a 75% de probabilidade para o período de 30 dias, para o mês de março	55
Tabela 11. Estudo comparativo entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade e a evapotranspiração média, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias do mês de março	58
Tabela 12. Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Normal para as pentadas do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência	62
Tabela 13. Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Normal para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência	63

Tabela 14. Valores da evapotranspiração de referência para as pentadas do mês de setembro, para um período de 30 anos ...	64
Tabela 15. Valores da evapotranspiração de referência para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, para um intervalo de 30 anos	65
Tabela 16. Parâmetros estatísticos referentes aos dados de evapotranspiração do mês de setembro, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias, de um intervalo de 30 anos ..	67
Tabela 17. Parâmetros p e q da distribuição Beta para os dados de evapotranspiração do mês de setembro, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias	68
Tabela 18. Evapotranspiração de referência calculada através da distribuição Beta para as pentadas do mês de setembro, em função dos diversos níveis de probabilidade de ocorrência	70

Tabela 19. Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Beta para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, em função dos diversos níveis de probabilidade de ocorrência	71
Tabela 20. Relação entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade em um determinado período e a evapotranspiração a 75% de probabilidade para o período de 30 dias, para o mês de setembro	72
Tabela 21. Estudo comparativo entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade e a evapotranspiração média, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias do mês de setembro	74
Tabela 22. Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Normal para as pentadas do mês de setembro, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência	77

Tabela 23. Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Normal para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência	78
Tabela 24. Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para as pentadas do mês de março, para um período de 71 anos	80
Tabela 25. Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, para um intervalo de 71 anos	82
Tabela 26. Parâmetros estatísticos referentes aos dados da precipitação pluvial do mês de março, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias, de um intervalo de 71 anos	84
Tabela 27. Parâmetros α e β da distribuição Gama utilizada na distribuição Mista, para os dados de precipitação pluvial do mês de março, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias	86

Tabela 28. Precipitação pluvial obtida através da distribuição Mista para as pentadas do mês de março, em função dos diversos níveis de probabilidade de ocorrência ..	87
Tabela 29. Precipitação pluvial obtida através da distribuição Mista para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência	88
Tabela 30. Estudo comparativo entre a precipitação pluvial ao nível de 75% e a precipitação pluvial média, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias do mês de março	90
Tabela 31. Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para as pentadas do mês de setembro, para um período de 71 anos	95

Tabela 32. Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, para um intervalo de 71 anos	97
Tabela 33. Parâmetros estatísticos referentes aos dados da precipitação pluvial do mês de setembro, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias, de um intervalo de 71 anos ..	99
Tabela 34. Parâmetros α e β da distribuição Gama utilizada na distribuição Mista para os dados de precipitação pluvial do mês de setembro, para os períodos de 5, 10 e 15 e 30 dias	101
Tabela 35. Precipitação pluvial obtida através da distribuição Mista para as pentadas do mês de setembro, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência ..	102

Tabela 36. Precipitação pluvial obtida através da distribuição Mista para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência	103
Tabela 37. Estudo comparativo entre a precipitação pluvial ao nível de 75% de probabilidade e a precipitação pluvial média, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias do mês de setembro	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- a = menor valor da série de dados de evapotranspiração, referente a um determinado período em estudo;
- b = maior valor da série de dados de evapotranspiração, referente a um determinado período em estudo;
- c = $\alpha - 1$ = parâmetro de forma "modificado" da distribuição Gama;
- C = coeficiente de unidades = $10^{-6}/86,4$;
- Cp = calor específico do ar atmosférico, assumido constante e igual a $1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;
- d = $1/\beta$ = parâmetro de escala "modificado" da distribuição Gama;
- e = base do logaritmo neperiano;
- e° = pressão de saturação de vapor, em kPa;
- ea = pressão de saturação de vapor de água atmosférico, em kPa;
- ed = pressão parcial de vapor de água atmosférico, em kPa;
- E = altitude local, em m;

- E_a = termo aerodinâmico de vapor de água ou poder evaporante do ar, em W/m^2 ;
- E_f = eficiência da irrigação;
- E_{To} = evapotranspiração da cultura de referência (neste estudo, grama), em mm/dia;
- $(E_{To})_p$ = evapotranspiração da cultura de referência no nível de probabilidade desejado;
- $f(x)$ = função densidade de probabilidade da distribuição Beta para $a \leq x \leq b$;
- $f(x')$ = função densidade de probabilidade da distribuição Beta para $0 \leq x' \leq 1$;
- $F(x')$ = distribuição acumulada Beta incompleta para $0 \leq x' \leq 1$, ou probabilidade de que a evapotranspiração de um dado período não exceda um valor x' ;
- $g(y)$ = função densidade de probabilidade da distribuição Gama incompleta, para $y \geq 0$;
- G = fluxo de calor para o solo, em W/m^2 ;
- $G(y)$ = distribuição acumulada Gama incompleta, ou probabilidade de que a precipitação em um dado período não exceda um valor y (seja menor ou igual a y);
- $G(y')$ = distribuição acumulada Gama incompleta, calculada utilizando valores de y maiores ou iguais a 1, ou seja, utilizando y' ;
- $G(v)$ = distribuição acumulada Gama incompleta, calculada através do desenvolvimento em série,

ou seja, é a probabilidade de ocorrência de um valor menor ou igual a y' , uma vez que $v=y'/\beta$;

h = tamanho do sub-intervalo adotado para aplicação do método de Simpson de cálculo aproximado de integrais definidas;

I = probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial ($y>1$), utilizada na distribuição Mista;

j = total de dados que compõem a série analisada de valores de evapotranspiração ou número de anos de observação deste evento;

J = número de valores iguais a zero na série de dados de precipitação pluvial do período considerado;

K = probabilidade de não ocorrência na precipitação pluvial ($y=0$), utilizada na distribuição Mista;

K_c = coeficiente de cultura durante o período de máxima exigência hídrica;

$\ln$ = operador do logaritmo neperiano;

m = número de ordem de um determinado valor de precipitação pluvial, pertencente a uma série decrescente de dados (m varia de 1 a n);

M = abreviatura indicativa do mês de Março;

$M(y)$ = distribuição acumulada Mista ou probabilidade de que a precipitação de um dado período não

exceda um valor y ;

n = número de anos de observação ou número de dados de uma série de valores de precipitação pluvial (valores nulos mais valores positivos);

n' = insolação, em horas;

$n(X)$ = função densidade de probabilidade da distribuição Normal;

N = duração máxima de brilho solar, em horas;

p = parâmetro da distribuição Beta ($p > 0$);

$\hat{p}$ = estimativa do parâmetro p ;

P = frequência em que foi igualado ou superado dado evento (neste estudo, a precipitação pluvial) de ordem m ;

P_a = pressão atmosférica local, em kPa;

$(P_e)_p$ = precipitação pluvial efetiva no nível de probabilidade desejado;

P_r = probabilidade teórica;

$P(y)$ = probabilidade de ocorrência de uma precipitação menor ou igual a um determinado valor y , obtida através de nomogramas elaborados por THOM (1951) e fundamentados na distribuição Gama;

q = parâmetro da distribuição Beta ($q > 0$);

$\hat{q}$ = estimativa do parâmetro q ;

Q = vazão ou capacidade do sistema de irrigação;

- r = coeficiente de reflexão da radiação na superfície (albedo);
 R_a = radiação solar na ausência da atmosfera, em W/m^2 ;
 R_n = radiação líquida, em W/m^2 ;
 R_s = radiação solar total incidente de ondas curtas (direta mais difusa), em W/m^2 ;
 s = desvio padrão dos dados da variável X ;
 S = abreviatura indicativa do mês de Setembro;
 t = temperatura média do ar atmosférico, em $^{\circ}C$;
 $t' = y'/\beta$ = relação utilizada nos nomogramas de THOM (1951) para estimar $P(y)$;
 (t_2-t_1) = duração do período de máxima exigência hídrica;
 T = temperatura média do ar atmosférico, em K ;
 T_r = período de retorno;
 U_{2m} = velocidade do vento a 2 m de altura, em m/s ;
 U_1 = velocidade do vento na altura de medição Z_1 ;
 U_2 = velocidade do vento na altura de medição Z_2 ;
 $UR\%$ = umidade relativa, em %;
 $v = y'/\beta$ = artifício de cálculo utilizado;
 w = número de termos utilizados no método de Simpson, sendo sempre ímpar. Depende do número de sub-intervalos de tamanho h (neste estudo adotou-se 20 sub-intervalos, sendo, portanto, $w=21$);
 W = área plantada com determinada cultura;

- x = qualquer valor da variável evapotranspiração de referência, em mm/dia, compreendido no intervalo (a,b) ;
- x' = variável evapotranspiração de referência transformada, de tal modo que $0 \leq x' \leq 1$;
- X = variável que apresenta distribuição Normal. Neste estudo a distribuição Normal foi aplicada aos dados de evapotranspiração ($X=x$) e aos dados de precipitação pluvial ($X=y$);
- $\bar{X}$ = média aritmética dos dados da variável X ;
- y = variável precipitação pluvial ($y \geq 0$), em mm;
- y' = valores da variável precipitação pluvial maiores ou iguais a 1 ($y' \geq 1$ mm), em mm;
- Y_k = precipitação acumulada no período considerado, em cada ano;
- Y_m = valor médio da precipitação no período considerado;
- α = parâmetro de forma da função Gama ($\alpha > 0$);
- $\hat{\alpha}$ = estimativa de α ;
- β = parâmetro de escala da função Gama ($\beta > 0$);
- $\hat{\beta}$ = estimativa de β ;
- γ = constante psicrométrica, em kPa/°C;
- Γ = símbolo da função Gama;
- δz = quantidade de água disponível fornecida pelo solo durante o período de máxima exigência hídrica;

Δ = inclinação da curva de variação da pressão de saturação de vapor de água com a temperatura (de°/dt);

Δe = déficit de pressão de vapor de água atmosférico, em kPa;

λ = calor latente de vaporização da água, em J/kg;

μ_1 = momento de ordem 1 da variável x' ;

μ_2 = momento de ordem 2 da variável x' ;

π = 3,14159

ρ_v = massa específica da água, em kg/m^3 ;

σ = constante de Stefan-Boltzmann = $5,673114 \cdot 10^{-8}$
 $W/(m^2 \cdot K^4)$.

ESTUDO DAS DISTRIBUIÇÕES DE FREQUENCIA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL
PARA FINS DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Autor: JOÃO CARLOS CURY SAAD

Orientador: PROF. DR. KLAUS REICHARDT

RESUMO

Utilizando dados de 71 anos de precipitação pluvial e de 30 anos de evapotranspiração de referência, estimada pelo método de Penman, procedeu-se à análise da distribuição de frequência destes eventos, aplicada aos períodos de 5 dias, 10 dias, 15 dias e mensal, referentes aos meses de março e setembro, para a região de Piracicaba, SP.

Através do teste de Kolmogorov-Smirnov, verificou-se que os dados de precipitação podem ser representados por uma distribuição Mista, envolvendo a distribuição Gama, enquanto que os de evapotranspiração de referência podem ser caracterizados pelas distribuições Beta e Normal, sendo esta última de maior praticidade na aplicação.

Analisando os dados de evapotranspiração verificou-se que os mesmos estavam relativamente

agrupados, sendo recomendável o estudo de distribuição de frequência. Os dados revelaram que à medida que diminui o intervalo em dias, aumenta o valor da evapotranspiração.

Já os dados de precipitação pluvial apresentaram grande dispersão, sendo fundamental a análise de frequência a fim de se proceder a um dimensionamento adequado dos sistemas de irrigação.

O uso de valores médios mensais de precipitação, quando comparados ao critério de dimensionamento que estabelece a probabilidade de 75% como sendo a mais indicada, mostrou ser uma prática que conduz ao subdimensionamento dos sistemas de irrigação.

O dimensionamento de sistemas de irrigação depende do uso criterioso de estimativas da evapotranspiração e, fundamentalmente, das estimativas da precipitação pluvial.

STUDY OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION AND RAINFALL
FREQUENCY DISTRIBUTIONS AS RELATED TO IRRIGATION SYSTEMS
DESIGN.

Author: JOÃO CARLOS CURY SAAD

Adviser: PROF. DR. KLAUS REICHARDT

SUMMARY

Using 71 year rainfall and 30 year reference evapotranspiration data an analysis of their frequency distributions was made with the objective of improving irrigation systems design. These parameters were studied using time periods of 5, 10, 15 and 30 days, during the months of March to September, for the region of county of Piracicaba, SP.

Through the Kolmogorov-Smirnov test it was verified that rainfall data can be represented by Gamma distributions, whereas reference evapotranspiration data follow Beta distributions and Normal distributions.

The analysis of evapotranspiration data showed that values are relatively gathered, leading to the conclusion that distribution analysis is useful. Data indicated that as time intervals are decreased, the value of evapotranspiration increases.

On the other hand, rainfall data presented high dispersion, indicating the need of frequency analysis in order to use the data for the design of irrigation systems.

The use of monthly mean rainfall values, when compared to the design criterium that establishes the probability of 75% as being the most suitable, showed to be a procedure that leads to underestimations in irrigation systems design.

The design of irrigation systems depends on the criterious use of evapotranspiration estimates and, mainly, of rainfall estimates.

1. INTRODUÇÃO

A água é fator fundamental na produção vegetal, tendo sua falta ou excesso influência decisiva no desenvolvimento das plantas. Por esta razão, o conhecimento da exigência em água das culturas, bem como o manejo racional dos recursos hídricos, são fatores fundamentais na maximização da produção agrícola.

Segundo MAROUELLI & SEDIYAMA (1987), o Brasil, apesar de não contar com rigores climáticos excessivos, é dotado de uma diversidade de tipos climáticos. A distribuição da precipitação atmosférica sobre seu território é bastante variável, estando, contudo, a maior parte das regiões sob clima úmido e semi-úmido. Nestas regiões, de maneira geral, a quantidade de precipitação é suficiente para o bom desenvolvimento das culturas no período chuvoso, porém, freqüentemente, ocorrem períodos de escassez de chuva durante os estádios mais críticos da cultura, resultando em sensíveis perdas de produção. Para solucionar este problema, utiliza-se a irrigação suplementar, que visa, justamente, corrigir a distribuição irregular das precipitações. Entretanto,

quase todos os projetos de irrigação desenvolvidos no Brasil são dimensionados em termos de irrigação total, ou seja, visando suprir toda a demanda hídrica da cultura, sem levar em conta a precipitação pluvial.

O dimensionamento de sistemas de irrigação em termos de irrigação total é válido quando se trata de regiões áridas e semi-áridas, como é o caso de determinadas regiões do nordeste brasileiro. Em se tratando de regiões úmidas e semi-úmidas, tal prática resulta num superdimensionamento dos sistemas de irrigação.

A evapotranspiração e a precipitação são parâmetros fundamentais na estimativa da exigência em água das culturas. Apesar de numerosos, nenhum método de estimativa da evapotranspiração parece desfrutar de uma preferência absoluta. Segundo SAAD & SCALOPPI (1988a), na maioria das vezes, a indisponibilidade de parâmetros específicos limita o emprego de métodos mais precisos e favorece os métodos mais simples, nem sempre proporcionando resultados satisfatórios. Além disso, a grande variabilidade de valores assumidos pelos parâmetros meteorológicos durante o período de máxima exigência hídrica das culturas irrigadas, acarreta considerável dispersão dos valores calculados da evapotranspiração, sugerindo uma análise de distribuição de frequência dos valores estimados, para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação (SAAD & SCALOPPI, 1988b).

Uma vez que a precipitação é o parâmetro mais variável dos modelos de estimativa da exigência em água das culturas, é fundamental o estudo de distribuição de frequência de seus valores num determinado intervalo de anos. Segundo FRIZZONE (1979), em muitos casos utiliza-se o valor da precipitação média mensal no balanço hídrico para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação, o que, em geral, acarreta um subdimensionamento do projeto.

O uso de estimativas da necessidade de água das culturas obtidas sem nenhum critério ou resultantes de modelos nem sempre capazes de proporcionar resultados confiáveis, tem se refletido, na maioria das vezes, num dimensionamento inadequado dos sistemas de bombeamento, de adução e distribuição, de aplicação de água às culturas, e de remoção da água excedente, característicos de cada sistema de irrigação.

A identificação da necessidade de água também influencia no planejamento e operação de programas estratégicos de desenvolvimento local ou regional, baseados na utilização de recursos hídricos.

Este trabalho tem como objetivo estudar a distribuição de frequências da evapotranspiração de referência e, também, da precipitação pluvial, para a região de Piracicaba, SP, visando a obtenção de estimativas criteriosas da exigência em água das culturas, que é fator fundamental no dimensionamento de sistemas de irrigação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Evapotranspiração de referência

2.1.1. Considerações gerais

Antes de caracterizar o método de estimativa da evapotranspiração adotado neste trabalho, torna-se oportuno caracterizar a terminologia empregada nesta dissertação.

Segundo BURMAN et alii (1983), a evapotranspiração pode ser definida como um processo combinado de transferência de água do solo para atmosfera, incluindo a evaporação da água diretamente da superfície do solo ou da vegetação e, também, o processo de transpiração através dos tecidos vegetais. A evapotranspiração pode ser expressa como calor latente transferido para o ar atmosférico, por unidade de área (W/m^2) ou a quantidade equivalente de água evapotranspirada por unidade de tempo, geralmente expressa como lâmina por unidade de tempo (mm/dia).

A evapotranspiração potencial de referência

(ET_o) é definida como sendo a quantidade de água evapotranspirada por uma cultura de baixo porte, verde, cobrindo totalmente o solo, de altura uniforme e sem deficiência hídrica. Para esta superfície, as condições climáticas comandam o processo evapotranspirativo. Em vista disto, a evapotranspiração potencial de referência é tomada como um elemento meteorológico de referência para estudos comparativos de perda de água pela vegetação, em diferentes situações e locais (REICHARDT, 1987).

Em relação à cultura de referência, os pesquisadores dividem-se entre a grama e a alfafa. DOORENBOS & PRUIT (1984) adotaram como sendo a evapotranspiração potencial de referência, a evapotranspiração de uma extensa superfície totalmente coberta com grama verde, tendo altura uniforme, variável entre 8 e 15 cm, em fase de crescimento ativo, e adequadamente suprida com água. No Brasil, adota-se a grama forquilha (Paspalum notatum, L.).

WRIGHT & JENSEN (1972) defenderam a idéia de que uma cultura de referência deveria apresentar características aerodinâmicas e morfológicas semelhantes às principais culturas. As características aerodinâmicas afetam a advecção de calor sensível, enquanto uma arquitetura foliar na qual as folhas estão dispostas em camadas, resulta em maior absorção da radiação solar, antes desta atingir a superfície do solo. Por estas razões, elegeram a alfafa que possui de 30 a 50 cm de

altura, em fase de crescimento ativo e sem restrições no fornecimento de água no solo, como cultura de referência.

A determinação da evapotranspiração potencial para uma única cultura de referência simplifica a estimativa da evapotranspiração de outras culturas irrigadas em diferentes estádios fenológicos, através de relações empíricas denominadas coeficientes de cultura.

Tanto o método de estimativa da evapotranspiração como o coeficiente de cultura devem estar baseados na mesma cultura de referência. Assim, os coeficientes de cultura determinados em função da alfafa como cultura de referência não devem ser utilizados com os métodos propostos para estimar a evapotranspiração da cultura de referência-grama. O inverso também deve ser evitado.

2.1.2. Seleção do método para estimativa da evapotranspiração de referência

JENSEN (1974) analisou quinze métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, comparando seus resultados com valores observados em dez localidades apresentando condições climáticas bastante distintas. Concluiu que equações que utilizam o balanço de energia ou balanço de energia associado ao termo aerodinâmico fornecem os resultados mais precisos, uma vez que baseiam-se em leis físicas e relações racionais. Dentre

estas, o método de Penman destaca-se como o mais apropriado.

2.1.3. Método de Penman

A equação de PENMAN (1948) foi proposta para estimativa da evaporação em superfícies livres d'água e para solo nu. Ela é muito eficiente, pois utiliza um modelo associativo aero-energético no cálculo da estimativa da evapotranspiração. Como as superfícies vegetadas diferem significativamente das superfícies livres d'água, no que concerne à rugosidade e, conseqüentemente, na estrutura do vento, algumas modificações foram introduzidas para possibilitar seu uso na estimativa da evapotranspiração das culturas.

ALLEN (1986) comparou 10 formas do método de Penman com medições feitas em lisímetros instalados em Kimberly, Idaho; Coshocton, Ohio; e Davis, Califórnia; representantes, respectivamente, de região árida irrigada, região úmida com índice de precipitação pluvial suficiente e região de clima mediterrâneo. Dentre as versões analisadas, o modelo de Penman-Monteith foi o que forneceu melhores estimativas, porém sua utilização é bastante limitada devido aos parâmetros requeridos, os quais não são convencionalmente medidos, como é o caso da temperatura da folha.

SAAD & SCALOPPI (1988c) apresentaram um

programa multi-alternativo de estimativa da evapotranspiração de referência, utilizando o método de Penman-Monteith com algumas adaptações. O programa foi aplicado a dados referentes a Kimberly, Idaho, num total de 35 alternativas de cálculo, sendo que o maior desvio entre os valores estimados e o valor medido da evapotranspiração foi de -17,5% .

O método de Penman-Monteith requer estudos mais intensos para que possa ser utilizado de forma criteriosa, em nossas condições.

2.1.4. Distribuição de frequência da evapotranspiração

Poucos locais do mundo apresentam registros de evapotranspiração de uma única cultura por um período suficiente para possibilitar uma análise de distribuição de frequência. Um desses locais refere-se aos dados obtidos com lisímetro em Davis, Califórnia, continuamente cultivado com grama desde junho de 1959 (PRUITT et alii, 1972). Estes dados permitiram a estes autores estabelecer a distribuição de frequência da evapotranspiração diária para todos os meses do ano, em períodos de 1, 3, 5, 7, 15 e 30 dias consecutivos, para a região central da Califórnia. Trabalho semelhante foi apresentado por NIXON et alii (1972) para a região costeira da Califórnia.

WRIGHT & JENSEN (1972) utilizaram dados de

evapotranspiração de uma cultura de alfafa bem suprida de água, obtidos durante dois anos em lisímetro pesável de precisão para desenvolver e avaliar procedimentos para estimativa da evapotranspiração, a partir de parâmetros climáticos, para a região sul de Idaho, EUA. Estes procedimentos foram utilizados para cálculo da evapotranspiração por um período de cinco anos, cujos resultados permitiram avaliar a distribuição de frequência para períodos consecutivos de 1, 3, 5, 7, 15 e 30 dias. Através dos resultados obtidos foi possível identificar significativas diferenças entre os valores de evapotranspiração computados. Além disso, os períodos de maior exigência hídrica puderam ser facilmente identificados, demonstrando a necessidade de se efetuar esta análise em planejamentos precisos de engenharia de irrigação.

O emprego da análise de distribuição de frequência aos dados mensais de evaporação do tanque IA-58, para Ribeirão Preto, SP, foi conduzido por ARRUDA & BARROSO (1984). Utilizando dados registrados no período de 1967 a 1975 e aplicando a distribuição Normal, os autores concluíram que os valores médios mensais correspondentes ao nível de 75% de probabilidade foram significativamente superiores aos valores médios mensais registrados no período. Estas diferenças atingiram valores máximos de 34% no mês de dezembro e 32% no mês de março. Esta análise, porém, não foi aplicada a períodos mais curtos,

representativos dos períodos de máxima exigência hídrica das culturas irrigadas, normalmente desenvolvidas na região.

SAAD & SCALOPPI (1988b) aplicaram o método de Penman-Monteith a dados meteorológicos de Piracicaba, SP, e realizaram, então, estudos sobre a distribuição de frequência das estimativas da evapotranspiração, através do uso da distribuição Normal. Os resultados obtidos permitem que se proceda à seleção de valores representativos da evapotranspiração, em períodos consecutivos de 1 a 30 dias, e níveis de probabilidade variáveis entre 2 e 98% .

YAO (1969) verificou que a distribuição de frequência de um índice R relacionado com a evapotranspiração de referência, ajustou-se satisfatoriamente com a distribuição Beta, para períodos de quinze dias e mensais.

Os dados de umidade relativa de 19 Estações Meteorológicas dos EUA, para períodos médios de 5, 10, 15 e 30 dias, ajustaram-se, de forma estatisticamente consistente, à distribuição Beta (YAO, 1974).

O índice de umidade definido por BISHNOI (1980) como sendo a relação entre a evapotranspiração atual e a evapotranspiração potencial de referência, também ajustou-se significativamente à distribuição Beta.

2.2. Precipitação pluvial provável ou dependente

2.2.1. Considerações gerais

A precipitação provável ou dependente é aquela precipitação mínima que tem uma probabilidade específica de ocorrência, baseada na análise de uma longa série de dados.

Segundo HOLTZ (1973), os dados observados nos postos hidrométricos são analisados estatisticamente, ou seja, verifica-se com que frequência eles assumiram determinada magnitude e, em seguida, pode-se analisar as probabilidades teóricas de ocorrência dos mesmos. Os dados de precipitação são classificados em ordem decrescente e a cada dado é atribuído um número de ordem m (m variando de 1 a n , sendo n o número de anos de observação). Três equações podem ser utilizadas para determinar a frequência (P) em que foi igualado ou superado dado evento de ordem m (FRIZZONE, 1979): equação de Hazen, equação de Kimball e equação da Califórnia.

A equação de Hazen tem a seguinte forma:

$$P = \frac{(2.m) - 1}{2.n} \quad (1)$$

As equações de Kimball e Califórnia são descritas, respectivamente, por:

$$P = \frac{m}{n + 1} \quad (2)$$

$$P = \frac{m}{n} \quad (3)$$

Admitindo-se que a frequência (P) é uma boa estimativa da probabilidade teórica (Pr) e definindo-se o período de retorno (Tr) como sendo o intervalo médio de anos em que um determinado evento deve ser igualado ou superado, pelo menos uma vez, tem-se a seguinte relação:

$$Tr = \frac{1}{P} \quad \text{ou} \quad Tr = \frac{1}{Pr} \quad (4)$$

Para períodos de recorrência bem menores que o número de anos de observação, o valor encontrado para P pode resultar numa boa aproximação do valor real de Pr. Entretanto, para grandes períodos, deve-se adotar outro procedimento, ou seja, a distribuição de frequência deve ser ajustada a uma lei de probabilidade teórica, de modo a possibilitar um cálculo mais preciso da probabilidade (MAROUELLI & SEDIYAMA, 1987).

2.2.2. Distribuição de frequência da precipitação pluvial

Considerando uma simples curva de distribuição de frequências, a média aritmética é uma das variáveis utilizadas para determinar a distribuição Normal. Nessa distribuição, a linha vertical de simetria passa pela média da distribuição, sendo também o valor da mediana e da moda. A distribuição Normal ajusta-se bem a muitas variáveis climáticas que não são limitadas superior e inferiormente. Porém, as precipitações em pequenos períodos são, em geral, limitadas inferiormente pelo valor zero, o que dificilmente lhes confere uma distribuição Normal.

BARGER & THOM (1949), através de análises em histogramas de frequência de precipitação, verificaram que as distribuições de precipitações diárias e semanais ajustam-se a uma curva exponencial negativa. Já para períodos iguais ou superiores a quatro meses, estas aproximam-se da distribuição Normal. Entretanto, constatarem, também, que qualquer dos períodos anteriormente citados, poderia ser ajustado através de uma curva de Pearsons tipo III. Forçando esta curva a passar pela origem, a fim se evitar valores negativos de precipitação, os autores verificaram que ela passa a ser a distribuição Gama incompleta, a qual recomendaram para estudos de precipitação em pequenos períodos.

Seja y uma variável aleatória que assume apenas valores não negativos. Diz-se que y tem uma distribuição de probabilidade Gama incompleta, caso sua função densidade de probabilidade $g(y)$, apresentada por THOM (1958), seja dada por:

$$g(y) = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot y^{\alpha-1} \cdot e^{-y/\beta} \quad (5)$$

sendo, $\beta > 0$, $\alpha > 0$, $0 \leq y < \infty$ e $g(y) = 0$ para outros intervalos; onde β é o parâmetro de escala (depende da variabilidade das precipitações no período); α é o parâmetro de forma (seu valor é proporcional à precipitação no período); Γ é o símbolo da função Gama; e é a base do logaritmo neperiano. Neste estudo, y é a precipitação pluvial no período.

A função Gama, segundo MILLER & WEAVER (1968), é definida por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} e^{-y} \cdot y^{\alpha-1} \cdot dy \quad (6)$$

sendo $0 \leq y \leq \infty$ e $\alpha > 0$.

A fórmula de recorrência para a função Gama é (SPIEGEL, 1976):

$$\Gamma(\alpha+1) = \alpha \cdot \Gamma(\alpha) \quad (7)$$

onde $\Gamma(1)=1$. Através da eq.(7) é possível se determinar $\Gamma(\alpha)$ para todo $\alpha > 0$, desde que se conheça os valores de $\Gamma(\alpha)$ para $1 \leq \alpha \leq 2$ (Tabela 1) ou qualquer outro intervalo de valor unitário.

Tabela 1 - Valores de $\Gamma(\alpha)$ para $1 \leq \alpha \leq 2$.

α	$\Gamma(\alpha)$
1,00	1,0000
1,10	0,9514
1,20	0,9182
1,30	0,8975
1,40	0,8873
1,50	0,8862
1,60	0,8935
1,70	0,9086
1,80	0,9314
1,90	0,9618
2,00	1,0000

Fonte: SPIEGEL (1976)

Em particular, se α é um número inteiro positivo, então :

$$\Gamma(\alpha+1) = (\alpha)! \quad (8)$$

Se α for muito grande, o cálculo de $\Gamma(\alpha)$ pela eq.(7) torna-se muito trabalhoso. Neste caso, utiliza-se a série assintótica de Stirling para a função Gama, dada por :

$$\Gamma(\alpha+1) = (2\pi\alpha)^{1/2} \cdot \alpha^\alpha \cdot e^{-\alpha} \cdot \left[1 + \frac{1}{12\alpha} + \frac{1}{288\alpha^2} - \frac{139}{51840\alpha^3} + \dots \right]$$

(9)

A função densidade de probabilidade da distribuição Gama $g(y)$ é positivamente assimétrica e o grau de assimetria depende inversamente do parâmetro de forma α . A moda da distribuição é $\beta(\alpha-1)$ se $\alpha > 1$, e zero se $0 \leq \alpha \leq 1$.

A probabilidade de que a precipitação em um dado período não exceda um valor y , denominada $G(y)$, é dada pela distribuição acumulada Gama incompleta, apresentada por MILLER & WEAVER (1968), FRIZZONE (1979) e TOLEDO FILHO (1988), como sendo :

$$G(y) = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \int_0^y e^{-y/\beta} \cdot y^{\alpha-1} \cdot dy \quad (10)$$

Fazendo-se $\alpha=c+1$ e $\beta=(1/d)$, onde c é o parâmetro de forma e d o de escala, pode-se escrever a eq. (10) da seguinte forma, conforme apresenta BERNARDO (1975) :

$$G(y) = \int_0^y \frac{e^{-d \cdot y} \cdot y^c \cdot d^{(c+1)}}{\Gamma(c+1)} \cdot dy \quad (11)$$

a qual é também apresentada por BARGER & THOM (1949), FRIEDMAN & JAMES (1957), WEAVER & MILLER (1967), VIVALDI (1973), HARGREAVES (1973), GOODWIN & SANS (1976), autores estes que utilizaram a distribuição acumulada Gama

incompleta na forma da eq. (11) para determinar a probabilidade de precipitação.

As integrais definidas pelas eqs. (10) e (11), representam a área sob a curva $g(y)$, no intervalo de 0 a y . Estas integrais podem ser determinadas através de desenvolvimento em série (VIVALDI, 1973 ; GALATE, 1987 ; TOLEDO FILHO, 1988), através da aproximação de Newton-Raphson (BERNARDO, 1975 ; FRIZZONE, 1979), ou ainda, por meio de métodos numéricos de cálculo aproximado de integrais definidas, como é o caso do método de Simpson.

O maior problema no uso de qualquer procedimento estatístico está na estimativa dos parâmetros. Através do método da Máxima Verossimilhança, THOM (1958) estimou os parâmetros α e β da distribuição Gama, utilizando as equações :

$$\hat{\beta} = \frac{Y_m}{\hat{\alpha}} \quad (12)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + [1 + (4.A/3)]^{1/2}}{4.A} \quad (13)$$

$$A = \ln(Y_m) - \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \ln(Y_k) \quad (14)$$

onde Y_m é o valor médio da precipitação no período; Y_k

é a precipitação acumulada no período, em cada ano; n é o número de anos com dados de precipitação diária e $\ln$ é o operador do logaritmo neperiano.

THOM (1951) elaborou nomogramas para determinação da probabilidade de ocorrência $P(y)$ de uma precipitação menor ou igual a um determinado valor y , fundamentados na distribuição Gama incompleta. Nesses nomogramas os níveis de probabilidade $P(y)$ aparecem na abscissa e os valores $t'=y/\beta$ na ordenada, sendo cada curva traçada para um valor de α .

A distribuição Gama incompleta tem proporcionado resultados satisfatórios na estimativa da distribuição de frequência de dados de precipitação para períodos mensais (BARGER & THOM, 1949 ; VIVALDI, 1973 ; FRIZZONE, 1979 ; GALATE, 1987 ; TOLEDO FILHO, 1988).

Segundo FRIZZONE (1979), a distribuição Gama proporcionou estimativas satisfatórias nos períodos de 5, 10, 15 dias e mensal, para dados de 30 anos da região de Viçosa, MG.

2.3. Modelo matemático para dimensionamento de sistemas de irrigação

Existem muitas formas de se estimar a exigência em água das culturas e, desta forma, dimensionar os sistemas de irrigação.

JENSEN (1974) propôs um modelo que tem a seguinte forma :

$$Q = [\int_{t_1}^{t_2} K_c \cdot (ET_o)_p \cdot dt - \delta z - (Pe)_p] / [E_f \cdot (t_2 - t_1)] \quad (15)$$

onde Q é a vazão ou capacidade do sistema ; Kc é o coeficiente de cultura durante o período de máxima exigência hídrica ; (ETo)_p é a evapotranspiração da cultura de referência, no nível de probabilidade desejado ; δz é a quantidade de água disponível fornecida pelo solo durante o período de máxima exigência hídrica ; (Pe)_p é a precipitação pluvial efetiva, no nível de probabilidade desejado; E_f é a eficiência da irrigação definida pela relação entre a quantidade líquida de água requerida, expressa pelo numerador da eq.(15), e a quantidade introduzida no sistema adutor do projeto ; (t₂ - t₁) é a duração do período de máxima exigência hídrica considerado.

É oportuno observar que, para reduzir a capacidade do sistema, o procedimento assume que as condições de evapotranspiração nas fases anteriores ao período de pico possibilitam o acúmulo de certa quantidade de água disponível no solo, para utilização durante este período. Além disso, havendo exigência de lixiviação, esta deverá ser satisfeita fora deste período.

No caso de projetos dimensionados para

atender várias culturas, a capacidade (Q) do sistema deve ser determinada considerando os períodos de pico sobrepostos das culturas, ponderados em função das áreas (W) correspondentes a cada uma delas, conforme propôs JENSEN (1974) :

$$Q = (Q_1.W_1 + Q_2.W_2 + \dots + Q_n.W_n) / (W_1 + W_2 + \dots + W_n)$$

(16)

Este modelo é um exemplo de aplicação da distribuição de frequência da evapotranspiração e da precipitação, no dimensionamento de sistemas de irrigação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição geral

O presente estudo foi desenvolvido utilizando dados meteorológicos coletados no Posto Agrometeorológico pertencente ao Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-ESALQ-USP, localizado em Piracicaba, SP. O Posto está situado na latitude de $22^{\circ}42'30''$ sul e longitude de $47^{\circ}38'00''$ oeste, tendo altitude de 546 metros.

Segundo dados meteorológicos coletados no referido posto, a precipitação pluvial, em termos médios anuais, é de 1247,1 mm, ocorrendo a maior parte no verão (de novembro a fevereiro), principalmente como chuvas de alta intensidade e curta duração; a temperatura do ar é de $20,8^{\circ}\text{C}$, sendo a mínima da ordem de 10°C , em julho, e a máxima da ordem de 30°C , em janeiro; a umidade relativa do ar é de 69%; a velocidade do vento é de 2,5 m/s e o período de brilho solar é de 6h/dia (CERVELLINI et alii, 1973).

O clima da região é do tipo mesotérmico Cwa, pela classificação climática de Köppen, ou seja, sub-tropical úmido, com estiagem no inverno, com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e a do mês mais quente superior a 22°C, também denominado de tropical de altitude por CAMARGO et alii (1974).

3.2. Período utilizado

Como a irrigação em Piracicaba (SP) é normalmente desenvolvida durante o período de março a setembro, caracterizado por reduzidos índices pluviométricos, assumiu-se, no presente estudo, que o período de maior exigência hídrica das culturas irrigadas deveria ocorrer nos meses de março ou setembro, coincidindo com o estágio de maior desenvolvimento vegetativo das plantas cultivadas. Além disso, a utilização apenas dos meses de março e setembro visa não tornarem repetitivos os cálculos efetuados, sendo verdadeiramente importante a metodologia empregada.

Para estimativa da evapotranspiração de referência foram utilizados dados climáticos de um período de 30 anos, a saber: 1950 a 1968, 1977, 1979, 1981 a 1989. A razão da descontinuidade dos anos está ligada à falta de dados necessários à aplicação do método de Penman em determinados anos.

Para analisar a distribuição de frequência

dos dados de precipitação, foram utilizadas medições de 71 anos, a saber : de 1917 a 1971 e de 1973 a 1989.

Tanto para o estudo da distribuição da evapotranspiração de referência como para o da precipitação pluvial, os meses de março e setembro foram divididos em períodos de 5, 10, 15 dias e mensal. Foram estabelecidos os seguintes critérios para a divisão dos períodos :

- a) Períodos de 5 dias: cada mês foi dividido em 6 períodos que, para facilitar a identificação, foram caracterizados pelas legendas do tipo M(5)1, que no caso representa a primeira (número 1) pentada (número 5 entre parênteses) do mês de março (letra M). O mês de março tem 31 dias, ficando, desta forma, a última pentada com 6 dias.
- b) Períodos de 10 dias: cada mês foi dividido em 3 períodos de 10 dias, ficando a última dezena do mês de março com 11 dias.
- c) Períodos de 15 dias: os meses foram divididos em 2 períodos de 15 dias, ficando a segunda quinzena de março com 16 dias.
- d) Períodos mensais: o mês de março ficou com 31 dias, enquanto o mês de setembro ficou com 30 dias.

Os dados de evapotranspiração foram utilizados na forma de valor médio expressos em mm/dia. Por exemplo: para uma determinada quinzena de março o valor da evapotranspiração foi de 4,3 mm/dia .

Os dados de precipitação foram utilizados

na forma de total do período analisado, e não na forma de valor médio.

3.3. Parâmetros meteorológicos utilizados

Na estimativa da evapotranspiração foram utilizados, basicamente, dados de temperatura média do ar atmosférico, umidade relativa do ar, insolação e velocidade do vento.

No Posto Agrometeorológico da ESALQ, a temperatura média diária do ar atmosférico é obtida a partir da média aritmética entre a temperatura máxima e a temperatura mínima. Os termômetros estão instalados no abrigo termométrico padrão a 1,50 m da superfície do solo. A umidade relativa é medida via psicrômetro e a insolação é registrada via heliógrafo do tipo Campbell-Stokes. Já a velocidade do vento é medida por anemógrafo, tipo universal, acoplado a um catavento e disposto a 10 m de altura.

Os dados de precipitação são obtidos via pluviômetro.

3.4. Estimativa da evapotranspiração de referência

O método selecionado para estimativa da evapotranspiração de referência foi o de Penman, por apresentar elevada precisão.

3.4.1. Descrição da versão do método de Penman utilizada

O método de Penman , segundo ALLEN (1986), pode ser descrito pela equação :

$$C \cdot \rho_w \cdot \lambda \cdot E_{To} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot E_a \quad (17)$$

onde C é o coeficiente de unidades ($10^{-6}/86,4$); ρ_w é a massa específica da água, em kg/m^3 ; λ é o calor latente de vaporização da água, em J/kg ; E_{To} é a evapotranspiração da cultura de referência grama, em mm/dia ; Δ é a inclinação da curva de variação da pressão de saturação de vapor de água com a temperatura (de°/dt), calculada em função da temperatura média diária do ar atmosférico, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; γ é constante psicrométrica, em $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; R_n é o fluxo de energia radiante para a superfície, ou radiação líquida, em W/m^2 ; G é o fluxo de calor para o solo, em W/m^2 , assumido desprezível em períodos iguais ou superiores a um dia ; e E_a é o termo aerodinâmico de vapor de água ou poder evaporante do ar, em W/m^2 .

A cultura de referência adotada foi a grama forquilha (Paspalum notatum, L.) por ser a mais utilizada para estes fins, em nossas condições.

3.4.1.1. Estimativa de Δ

Os termos Δ e γ podem ser considerados fatores de ponderação que determinam a divisão da energia radiante incidente entre os processos de evaporação e convecção (MONTEITH, 1973). O valor de Δ pode ser calculado a partir da fórmula proposta por BOSEN (1960) para determinação da pressão de saturação de vapor sobre água :

$$e^{\circ} = 3,38639 \left[(0,00738 \cdot t + 0,8072)^8 - 0,000019 \cdot 1,8 \cdot t + 48 \right] + 0,001316 \quad (18)$$

onde e° é pressão de saturação de vapor, em kPa ; e t é a temperatura média do ar atmosférico, em $^{\circ}\text{C}$ ($-51^{\circ}\text{C} < t < 54^{\circ}\text{C}$).

Derivando a eq. (18) em relação a t , obtém-se :

$$\Delta = \frac{de^{\circ}}{dt} = 3,38639 \left[0,05904 (0,00738 \cdot t + 0,8072)^7 + 0,0000342 \right] \quad (19)$$

3.4.1.2. Estimativa de γ

A constante psicrométrica γ pode ser calculada por (BOSEN, 1960):

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P_a}{0,622 \cdot \lambda} \quad (20)$$

onde C_p é o calor específico do ar atmosférico, assumido constante e igual a 1005 J/(Kg.°C); P_a é a pressão atmosférica local, em kPa ; 0,622 é a constante correspondente à relação entre o peso molecular do vapor de água (18,016 g/mol) e o peso molecular aparente do ar seco (28,966 g).

A pressão atmosférica (P_a) foi estimada utilizando a expressão (TUBELIS & NASCIMENTO, 1980):

$$P_a = 101,3250 \left(1 - \frac{0,0065 \cdot E}{288} \right)^{5.2568} \quad (21)$$

onde P_a é dado em kPa e E é a altitude local, em m . Para este estudo $P_a = 94,90832$ kPa , uma vez que a altitude do Posto Agrometeorológico é de 548 m .

O calor latente de vaporização da água, λ , pode ser estimado pela expressão (BRUNT, 1952):

$$\lambda = 2491146 - 2135,268 \cdot t \quad , \text{ (J/kg)} \quad (22)$$

3.4.1.3. Estimativa de e_d e de e_a

CUENCA & NICHOLSON (1982) analisaram vários procedimentos de cálculo do déficit de pressão de vapor, recomendando que a escolha da forma de cálculo seja coerente com o método de estimativa utilizado. A forma adotada neste estudo foi a seguinte :

$$\Delta e = e_a - e_d = e_a - (e_a \cdot \text{UR}\%) \quad , \quad (\text{kPa}) \quad (23)$$

onde Δe é o déficit de pressão de vapor de água atmosférico, em kPa ; e_a é a pressão de saturação de vapor de água atmosférico, em kPa, calculada pela eq. (18), utilizando a temperatura média do ar ; e_d é a pressão parcial de vapor de água atmosférico, em kPa, calculada pela relação $e_a = e_d \cdot \text{UR}\%$; $\text{UR}\%$ é a umidade relativa expressa em percentagem.

3.4.1.4. Estimativa da radiação líquida (R_n)

O fluxo líquido de energia radiante na superfície ou radiação líquida representa o principal parâmetro meteorológico envolvido na evapotranspiração (PELTON et alii, 1960 ; DOSS et alii, 1964 ; TANNER, 1968 ; MONTEITH, 1973). Muitas formas de estimativa da radiação líquida são encontradas na literatura (JENSEN,

1974 ; WRIGHT, 1982). O procedimento adotado neste trabalho foi aquele apresentado por DOORENBOS & PRUITT (1984) e tem a seguinte forma :

$$R_n = (1-r).R_s - \sigma.T^4.[0,34 - 0,1391402.(ed)^{0,5}]$$

$$.(0,1 + 0,9.\frac{n'}{N}) \quad (24)$$

onde R_n é a radiação líquida, em W/m^2 ; r é o coeficiente de reflexão da radiação na superfície (albedo), que para a grama tem valor igual a 0,24 (MONTEITH, 1973) ; R_s é a radiação solar total incidente de ondas curtas (direta mais difusa), em W/m^2 ; σ é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é $5,673114.10^{-8} W/(m^2 . K^4)$; T é a temperatura média do ar expressa em K ; n' é a insolação, em horas ; N é a duração máxima de brilho solar, em horas, em função da latitude local e período considerado. Para Piracicaba, SP, $N = 12,1$ horas para o mês de março e $N = 12,0$ horas para o mês de setembro.

A radiação solar total incidente de ondas curtas (R_s) foi estimada utilizando a equação obtida por OMETTO (1981), para a região de Piracicaba, SP, cuja forma é :

$$R_s = (0,26 + 0,51.\frac{n'}{N}). R_a \quad ; \quad (W/m^2) \quad (25)$$

onde R_a é a radiação solar na ausência da atmosfera (recebida no topo da atmosfera), em W/m^2 , cujo valor para a região de Piracicaba, SP, é de $418,20 W/m^2$ para o mês de março e de $387,67 W/m^2$ para o mês de setembro.

3.4.1.5. Estimativa do termo de transferência aerodinâmica

A transferência aerodinâmica de vapor foi estimada por (PENMAN, 1948):

$$E_a = 2,63.(1 + 0,537.U_{2m}).(e_a - e_d).\lambda.p.w.C \quad ; \quad (W/m^2) \quad (26)$$

onde E_a é o termo de transferência aerodinâmica, expresso em W/m^2 ; U_{2m} é a velocidade do vento a 2m de altura, em m/s.

Os dados de velocidade do vento fornecidos pelo Posto Agrometeorológico, foram medidos a 10 m de altura. Para converter a velocidade do vento de 10 m para 2 m de altura foi utilizada a relação (TUBELIS & NASCIMENTO, 1980) :

$$\frac{U_2}{U_1} = (Z_2/Z_1)^{1/7} \quad (27)$$

onde U_1 é a velocidade do vento na altura de medição Z_1 e

U2 é a velocidade do vento na altura de medição Z2.

Neste estudo assumiu-se, para facilitar a aplicação do método de Penman, que a atmosfera permaneceu na condição de neutralidade (adiabática), embora isto ocorra muito raramente, ou talvez nunca, durante períodos de alta taxa de evapotranspiração. Geralmente, o que prevalece é a condição de não neutralidade da atmosfera, ou seja, existe fluxo de calor sensível da superfície para a atmosfera (instável) ou no sentido oposto (estável), havendo necessidade de se proceder correções nos cálculos da evapotranspiração (SILVA, 1986).

3.5. Estimativa da distribuição de frequência da evapotranspiração de referência

Através da revisão bibliográfica, foram encontrados indícios de que a evapotranspiração de referência poderia ser representada pelas distribuições Beta (YAO, 1969 ; FALLS, 1973 ; HAAN & BARFIELD, 1973 ; YAO, 1974 ; RAVELO & DECKER, 1979 ; BISHNOI, 1980) e Normal (ARRUDA & BARROSO, 1984 ; SAAD & SCALOPPI, 1988b), as quais foram estudadas e aplicadas aos dados deste estudo.

Segundo FALLS (1973), a função de densidade de probabilidade da distribuição Beta para o

intervalo (a,b) é :

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)} \cdot \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p) \cdot \Gamma(q)} \cdot \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^{p-1} \cdot \left(1 - \frac{x-a}{b-a} \right)^{q-1} \quad (28)$$

sendo $a \leq x \leq b$, $p > 0$, $q > 0$; onde a é o menor valor da série de dados; b é o maior valor da série de dados; p e q são os parâmetros da distribuição Beta; x é um valor qualquer da variável em estudo (evapotranspiração), compreendido no intervalo (a,b).

A distribuição Beta na forma em que se encontra sua função densidade de probabilidade na eq. (28) não pode ser aplicada, devendo ser transformada para utilização no intervalo (0, 1), através da seguinte relação :

$$x' = \frac{x-a}{b-a} \quad (29)$$

onde x' é a variável evapotranspiração transformada pela eq.(29), de tal forma que $0 \leq x' \leq 1$.

A função de densidade de probabilidade da distribuição Beta assume, então, a forma de :

$$f(x') = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p) \cdot \Gamma(q)} \cdot x'^{p-1} \cdot (1-x')^{q-1} \quad (30)$$

sendo $0 \leq x' \leq 1$, $p > 0$, $q > 0$

A forma da função densidade depende da

magnitude dos parâmetros p e q . Quando $p > 1$ e $q > 1$, a distribuição apresenta um pico ; quando $p < 1$ e $q < 1$, a distribuição tem a forma de um U ; quando $p < 1$ e $q \geq 1$, a forma é de um J invertido ; quando $p \geq 1$ e $q < 1$, a forma é de um J ; e quando $p = q$, a distribuição é simétrica, sendo um caso especial quando $p=q=1$ que representa a distribuição retangular.

A distribuição acumulada Beta incompleta $F(x')$ fornece a probabilidade de que, neste caso, a evapotranspiração em um dado período não exceda um valor x' , sendo representada pela equação (FALLS, 1973):

$$F(x') = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p) \cdot \Gamma(q)} \int_0^{x'} x'^{p-1} \cdot (1-x')^{q-1} \cdot dx' \quad (31)$$

sendo $0 \leq x' \leq 1$.

Estimativas dos parâmetros p e q da distribuição Beta são dificilmente obtidas utilizando o método da Máxima Verossimilhança. O procedimento aplicado foi o método dos Momentos, segundo o qual (PEARSON, 1934):

$$\hat{p} = \mu_1 \cdot (\mu_1 - \mu_2) / [\mu_2 - (\mu_1)^2] \quad (32)$$

$$\hat{q} = (1 - \mu_1) \cdot (\mu_1 - \mu_2) / [\mu_2 - (\mu_1)^2] \quad (33)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^j x'_i / j \quad (34)$$

$$\mu_2 = \sum_{i=1}^j x'^2_i / j \quad (35)$$

onde μ_1 é o momento de ordem 1 para a variável x' ; μ_2 é o momento de ordem 2 para a variável x' ; x'_i representa a evapotranspiração transformada pela eq. (29); j é o número total de dados que compõem a série analisada de valores de evapotranspiração (neste estudo $j=30$, uma vez que o período utilizado foi de 30 anos).

A eq. (31) foi resolvida pelo método de Simpson de cálculo aproximado de integrais definidas, que pode ser descrito por :

$$\int_a^b f(x)dx \cong (h/3) \cdot [f(x_1) + 4f(x_2) + 2f(x_3) + \dots + 4f(x_{v-1}) + f(x_v)] \quad (36)$$

A eq. (36) exige um número par de sub-intervalos de tamanho h , sendo, consequentemente, v ímpar. Neste estudo utilizaram-se 20 sub-intervalos.

Os níveis de probabilidade calculados foram de 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, e 95% , sendo que estes índices revelam a probabilidade de que a evapotranspiração seja menor ou igual a um

determinado valor.

A eq. (31) fornece a probabilidade de ocorrência de um determinado valor de evapotranspiração. Para se obter o inverso, ou seja, partindo-se de um valor de probabilidade encontrar o valor correspondente da evapotranspiração, podem-se utilizar processos iterativos, como o de Newton-Raphson, construir gráficos e deles tirar os valores, ou mesmo, utilizar a técnica de interpolação. O procedimento aqui adotado foi a interpolação linear, uma vez que, para efetuar o teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov, foi necessário calcular os valores da probabilidade segundo a distribuição Beta para todos os valores observados de evapotranspiração. Desta forma, as frequências foram amplamente identificadas, favorecendo o processo de interpolação e diminuindo sua imprecisão. Além disso, a evapotranspiração com uma casa decimal é suficiente para a finalidade de estimativa da exigência em água, visando o dimensionamento de sistemas de irrigação.

A função densidade de probabilidade da distribuição Normal é dada pela equação (SPIEGEL, 1985):

$$f(x) = \frac{1}{s \cdot (2\pi)^{1/2}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2s^2}} \quad (37)$$

onde $\bar{x}$ é a média aritmética e s é o desvio padrão dos dados da variável x .

3.6. Estimativa da distribuição de frequência da precipitação pluvial

Em períodos reduzidos (5 dias, por exemplo), frequentemente não há ocorrência de chuva, ou seja, a precipitação é igual a zero. O valor zero não pode ser utilizado na estimativa dos parâmetros α e β da distribuição Gama através do método da Máxima Verossimilhança. Abandonar esta informação e trabalhar somente com os valores não nulos ocasiona uma superestimativa da precipitação para um determinado nível de probabilidade. THOM (1951), para solucionar esta questão, introduziu o conceito de distribuição Mista para a precipitação pluvial e para outras variáveis climatológicas.

Na distribuição Mista, a precipitação é considerada um fenômeno aleatório, com probabilidade I de ocorrência e com probabilidade K de não ocorrência, de tal forma que, $I + K = 1$. Portanto, a distribuição acumulada Mista, $M(y)$, que fornece a probabilidade de que a precipitação de um dado período não exceda um valor y , tem a forma (THOM, 1951 ; THOM, 1966; THOM, 1968; VIVALDI, 1973 ; GALATE, 1987) :

$$M(y) = K + I.G(y') \quad (38)$$

$$\text{sendo} \quad K = \frac{J}{n} \quad (39)$$

$$\text{e} \quad I = 1 - K \quad (40)$$

onde J é o número de valores iguais a zero na série de dados de precipitação pluvial; n é o tamanho da série de dados de precipitação pluvial (valores nulos mais valores positivos); e $G(y')$ é a distribuição acumulada Gama incompleta, calculada utilizando-se os valores não nulos da série (y'), ou seja, valores maiores ou iguais a 1, uma vez que para valores de precipitação compreendidos entre 0 e 1 adotou-se o critério de aproximação para 1 no caso de $0,5\text{mm} \leq y < 1\text{ mm}$, e aproximação para 0 no caso de $0 < y < 0,5\text{ mm}$; y' são os valores de precipitação pluvial (y) maiores ou iguais a 1 mm.

Desta forma, de acordo com os valores da série de dados de precipitação pluvial, duas situações podem ocorrer (VIVALDI, 1973; GALATE, 1987):

a) a série não contém valores nulos: neste caso, a estimativa da frequência de ocorrência é obtida através da distribuição acumulada Gama incompleta $G(y')$. Sendo os valores de precipitação pluvial da série não nulos, ou seja, maiores ou iguais a 1, segundo a aproximação adotada neste estudo, é possível calcular os parâmetros α e β da distribuição Gama pelo método da Máxima Verossimilhança;

b) a série contém valores nulos: neste caso, utiliza-se a distribuição Mista, a qual contabiliza de maneira distinta a probabilidade de não ocorrência de precipitação (K) e a probabilidade de ocorrência (I). Desta forma, a distribuição Gama é aplicada somente aos dados de precipitação maiores ou iguais a 1, sendo possível, então, estimar os parâmetros α e β pelo método da Máxima Verossimilhança. É interessante notar que, quando não se tem valores nulos na série (caso a), $I=1$ e $K=0$, fazendo com que a distribuição Mista se reduza à distribuição acumulada Gama incompleta $G(y')$, ou seja, $M(y) = G(y')$.

Neste estudo, para as duas situações expostas anteriormente, os parâmetros α e β da distribuição Gama foram determinados através do método da Máxima Verossimilhança, descrito pelas eqs. (12), (13) e (14).

A distribuição acumulada Gama incompleta $G(y')$ é dada por:

$$G(y') = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \int_0^{y'} e^{-y'/\beta} \cdot y'^{\alpha-1} dy' \quad (41)$$

A eq. (41) que propicia calcular a distribuição acumulada Gama incompleta, ou seja, a probabilidade de ocorrência, foi resolvida através do

desenvolvimento em série (VIVALDI, 1973; GALATE, 1987; TOLEDO FILHO, 1988).

Fazendo-se $v=y'/\beta$, tem-se que $y'=v.\beta$ e $dy'=\beta.dv$, assumindo a eq.(41) a seguinte forma, para a variável v :

$$G(v) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} \cdot \int_0^v e^{-v} \cdot (v.\beta)^{\alpha-1} \cdot \beta \, dv \quad (42)$$

$$G(v) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \cdot \int_0^v e^{-v} \cdot v^{\alpha-1} \, dv \quad (43)$$

O termo e^{-v} pode ser resolvido pelo desenvolvimento em série de Maclaurin (PISKOUNOV, 1984), sendo:

$$e^{-v} = 1 - v + \frac{v^2}{2!} - \frac{v^3}{3!} + \dots + \frac{(-1)^z \cdot v^z}{z!} + \dots \quad (44)$$

Desta forma, a eq. (43) assume a forma de :

$$G(v) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \cdot \int_0^v \left(v^{\alpha-1} - v^\alpha + \frac{1}{2} \cdot v^{\alpha+1} - \frac{1}{6} \cdot v^{\alpha+2} \right. \\ \left. \pm \dots \right) \, dv \quad (45)$$

$$G(v) = \frac{v^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{v}{(\alpha+1)1!} + \frac{v^2}{(\alpha+2)2!} - \frac{v^3}{(\alpha+3)3!} \right. \\ \left. \pm \dots \right] \quad (46)$$

Através do desenvolvimento em série de Maclaurin (PISKOUNOV, 1984), tem-se que e^v é dado por:

$$e^v = 1 + v + \frac{v^2}{2!} + \frac{v^3}{3!} + \dots + \frac{v^z}{z!} + \dots \quad (47)$$

Multiplicando-se e dividindo-se a eq.(46) por e^v , tem-se :

$$G(v) = \frac{v^\alpha}{\alpha \cdot \Gamma(\alpha) \cdot e^v} \left[1 + \frac{v}{(\alpha+1)} + \frac{v^2}{(\alpha+1)(\alpha+2)} + \right. \\ \left. \frac{v^3}{(\alpha+1)(\alpha+2)(\alpha+3)} + \dots \right] \quad (48)$$

A eq.(48) fornece a probabilidade de ocorrência de um valor menor ou igual a y' , que é dada por $G(v)$, onde $v=y'/\beta$. Quanto maior o número de termos utilizados no desenvolvimento em série, melhor a estimativa da frequência esperada. Neste estudo, a série de Maclaurin foi utilizada com 13 termos.

Os valores de precipitação correspondentes

aos níveis de probabilidade de 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90 e 95% foram calculados via interpolação linear, conforme o procedimento descrito e utilizado para a evapotranspiração.

3.7. Teste de Kolmogorov-Smirnov

Para verificar o ajuste dos dados de precipitação pluvial e da evapotranspiração de referência às distribuições de probabilidade teóricas, aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov. No caso da evapotranspiração, o teste foi utilizado para analisar as distribuições Beta e Normal, e no caso da precipitação, para verificar a adaptação das distribuições Mista e Normal.

Segundo CAMPOS (1983), este teste verifica a adaptação de uma específica e bem conhecida distribuição a dados provenientes de uma distribuição desconhecida. Sua vantagem sobre o teste de χ^2 é que ele pode ser aplicado, sem restrições, para pequenas amostras. Além disso, ele trata os dados individualmente, não perdendo informações devido a agrupamentos, como ocorre no teste χ^2 .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Evapotranspiração de referência

As estimativas da evapotranspiração de referência para os meses em estudo, março e setembro, foram submetidas ao teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar se poderiam ser representadas pelas distribuições Beta e Normal. A hipótese H_0 foi aceita para todos os períodos analisados dos dois meses, ao nível de significância de 5%, para as duas distribuições citadas. Desta forma, conclui-se que as distribuições Beta e Normal estão estatisticamente aptas para representar os dados de evapotranspiração de referência deste estudo.

Os coeficientes de assimetria e de curtose foram calculados (Tabela 2 e 3) e analisados, verificando-se uma grande proximidade dos valores característicos da distribuição Normal (assimetria=0 e curtose=3), reforçando a conclusão obtida através do teste de Kolmogorov-Smirnov.

A distribuição Normal é bastante conhecida e facilmente aplicável, uma vez que apresenta tabulados os

Tabela 2 - Valores dos coeficientes de assimetria e curtose para os dados de evapotranspiração do mês de março, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias.

PERIODO	ASSIMETRIA	CURTOSE
M(5)1*	-0,152	2,930
M(5)2	0,616	2,481
M(5)3	-0,013	2,837
M(5)4	0,021	2,758
M(5)5	-0,566	2,197
M(5)6	-0,133	2,997
M(10)1	0,639	1,965
M(10)2	-0,093	2,910
M(10)3	-0,006	3,039
M(15)1	0,787	2,516
M(15)2	-0,292	3,150
M(30)	0,105	4,735

* M(5)1 - simboliza a primeira (1) pentada (5) do mês de março (M).

Tabela 3 - Valores dos coeficientes de assimetria e curtose para os dados de evapotranspiração do mês de setembro, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias.

PERIODO	ASSIMETRIA	CURTOSE
S(5)1	-0,273	2,475
S(5)2	0,130	2,606
S(5)3	0,350	2,916
S(5)4	-0,699	2,830
S(5)5	-0,089	2,177
S(5)6	0,224	3,899
S(10)1	-0,071	3,726
S(10)2	-0,080	4,168
S(10)3	-0,174	5,141
S(15)1	0,128	3,376
S(15)2	0,450	2,673
S(30)	-0,070	3,161

valores de sua distribuição acumulada. Já a distribuição Beta apresenta maior capacidade de adaptação, pois os parâmetros p e q podem assumir diversos valores, proporcionando as mais variadas formas para a função densidade de probabilidade da distribuição. Pode-se concluir que a distribuição Normal é mais facilmente aplicável, sendo recomendada para situações onde não se dispõe de recursos de cálculo mais elaborados, enquanto a distribuição Beta tem maior potencial de adaptação, porém requer procedimentos de cálculo mais elaborados e trabalhosos.

Recomenda-se, para fins práticos, o uso da distribuição Normal para o estudo de frequência de ocorrência da evapotranspiração de referência para os meses de março e setembro, em Piracicaba, SP. Caso não se verifique um bom ajuste, deve-se tentar o uso da distribuição Beta.

4.1.1. Evapotranspiração de referência para o mês de março

Os valores da evapotranspiração de referência obtidos pelo método de Penman, para os períodos de 5, 10, 15 dias e mensal, encontram-se dispostos em ordem decrescente nas Tabelas 4 e 5.

Analisando os parâmetros estatísticos da Tabela 6, verifica-se que a amplitude de variação dos

Tabela 4 - Valores da evapotranspiração de referência para as pentadas do mês de março, para um período de 30 anos.

Evapotranspiração de referência (mm/dia)					
PERIODO					
M(5)1	M(5)2	M(5)3	M(5)4	M(5)5	M(5)6
5,9	5,8	5,7	5,8	5,6	5,7
5,7	5,7	5,5	5,3	5,4	5,6
5,6	5,6	5,4	5,3	5,2	5,4
5,3	5,5	5,4	5,1	5,2	5,4
5,3	5,5	5,4	5,0	5,2	5,1
5,3	5,4	5,3	4,9	5,1	5,1
5,2	5,4	5,3	4,9	5,1	4,9
5,2	5,1	5,0	4,8	5,1	4,9
5,0	4,9	4,9	4,7	5,1	4,8
5,0	4,9	4,9	4,7	5,1	4,7
5,0	4,8	4,9	4,7	4,9	4,7
5,0	4,6	4,8	4,6	4,9	4,7
5,0	4,5	4,8	4,5	4,8	4,7
4,8	4,2	4,6	4,4	4,7	4,6
4,7	4,1	4,5	4,3	4,7	4,5
4,7	4,1	4,4	4,3	4,5	4,5
4,6	4,0	4,3	4,2	4,5	4,4
4,6	3,9	4,2	4,2	4,3	4,2
4,5	3,8	4,2	4,0	4,3	4,2
4,5	3,8	4,1	4,0	4,2	4,2
4,4	3,7	4,1	4,0	3,9	4,2
4,2	3,7	4,1	3,9	3,9	4,1
4,0	3,7	4,1	3,9	3,9	4,0
4,0	3,6	4,0	3,9	3,8	4,0
3,9	3,6	3,8	3,7	3,7	4,0
3,9	3,5	3,8	3,6	3,7	3,9
3,8	3,5	3,3	3,5	3,4	3,8
3,8	3,0	2,9	3,5	3,3	3,7
3,6	3,0	2,7	3,4	3,1	3,2
2,8	2,0	2,5	2,7	2,8	2,9

Tabela 5 - Valores da evapotranspiração de referência
para os períodos de 10, 15 e 30 dias do
mês de março, para um intervalo de 30 anos.

Evapotranspiração de referência (mm/dia)					
PERIODO					
M(10)1	M(10)2	M(10)3	M(15)1	M(15)2	M(30)
5,5	5,6	5,5	5,4	5,3	5,1
5,5	5,3	5,5	5,3	5,1	5,0
5,3	5,1	5,4	5,3	5,0	5,0
5,3	5,0	5,1	5,2	4,9	5,0
5,3	5,0	5,0	5,2	4,9	4,9
5,2	4,9	4,9	5,2	4,8	4,9
5,2	4,8	4,8	5,1	4,8	4,9
5,1	4,8	4,8	5,1	4,7	4,8
5,1	4,8	4,7	5,0	4,6	4,8
5,0	4,7	4,7	5,0	4,6	4,7
4,9	4,7	4,6	4,9	4,6	4,5
4,8	4,6	4,6	4,7	4,5	4,4
4,7	4,5	4,6	4,6	4,5	4,4
4,6	4,4	4,5	4,5	4,5	4,4
4,4	4,4	4,5	4,3	4,5	4,4
4,3	4,4	4,4	4,3	4,4	4,4
4,3	4,3	4,4	4,3	4,4	4,4
4,3	4,3	4,3	4,2	4,3	4,3
4,3	4,3	4,3	4,2	4,3	4,3
4,2	4,2	4,3	4,1	4,3	4,3
4,2	4,1	4,2	4,1	4,2	4,3
4,0	4,1	4,2	4,0	4,2	4,2
3,9	4,1	4,1	4,0	4,2	4,2
3,8	4,0	4,1	4,0	4,1	4,2
3,7	4,0	4,1	3,9	4,0	4,2
3,7	3,7	4,0	3,9	3,9	4,2
3,7	3,7	3,7	3,8	3,9	4,1
3,5	3,4	3,7	3,8	3,9	4,1
3,4	3,1	3,6	3,5	3,7	3,7
3,0	3,0	3,2	2,8	3,3	3,1

Tabela 6 - Parâmetros estatísticos referentes aos dados de evapotranspiração do mês de março, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias, de um intervalo de 30 anos.

PERIODO	AMPLI- TUDE (mm/dia)	MEDIA (mm/dia)	DESVIO PADRAO	VARIANCIA	COEF. DE VARIACAO (%)
M(5)1	3,1	4,6	0,689	0,475	14,8
M(5)2	3,8	4,3	0,935	0,874	21,7
M(5)3	3,2	4,4	0,817	0,667	18,4
M(5)4	3,1	4,3	0,666	0,443	15,4
M(5)5	2,8	4,5	0,727	0,529	16,4
M(5)6	2,8	4,5	0,645	0,416	14,5
M(10)1	2,5	4,5	0,680	0,463	15,2
M(10)2	2,6	4,4	0,604	0,365	13,8
M(10)3	2,3	4,5	0,528	0,279	11,8
M(15)1	2,6	4,5	0,628	0,395	14,1
M(15)2	2,0	4,4	0,430	0,185	9,8
M(30)	2,1	4,4	0,424	0,180	9,6

dados é reduzida, estando as estimativas bastante agrupadas, como pode ser confirmado ao se observarem os valores dos coeficientes de variação.

Neste estudo trabalhou-se com os dados provenientes da distribuição Beta, dada sua maior capacidade de adaptação.

Os parâmetros p e q da distribuição Beta encontram-se na Tabela 7, sendo que em todos os períodos foram maiores que 1, o que indica que a curva que descreve a função densidade tem um pico. A Figura 1 representa a função densidade de probabilidade da distribuição Beta para a quarta pentada do mês de março, denominada por M(5)4.

Através da distribuição Beta aplicada aos dados de evapotranspiração, obtiveram-se os valores de evapotranspiração para os níveis de 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90 e 95% de probabilidade (Tabelas 8 e 9). Convém esclarecer, que estes níveis de probabilidade representam os limites de ocorrência de valores iguais ou inferiores aos estabelecidos. Assim, por exemplo, existe 75% de probabilidade de que o valor da evapotranspiração de referência para a primeira quinzena do mês de março não ultrapasse 5,0 mm/dia. Outra forma de interpretação consiste em supor que, em três de cada quatro anos, o valor da evapotranspiração será igual ou menor que 5,0 mm/dia. Este tipo de enfoque é muito útil ao dimensionamento de sistemas de irrigação, pois conduz a

Tabela 7 - Parâmetros p e q da distribuição Beta para os dados de evapotranspiração do mês de março, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias.

PERIODO	$\hat{p}$	$\hat{q}$
M(5)1	2,220595	1,470314
M(5)2	1,791331	1,156216
M(5)3	1,629892	1,070686
M(5)4	2,238072	2,019091
M(5)5	1,550616	1,145425
M(5)6	2,082957	1,656637
M(10)1	1,364033	1,009394
M(10)2	1,936209	1,715183
M(10)3	2,104774	1,675883
M(15)1	1,888454	1,157223
M(15)2	2,427304	1,816892
M(30)	2,859039	1,440786

Figura 1 - Função densidade da distribuição Beta aplicada aos dados de evapotranspiração para a quarta pentada do mês de março.

Tabela 8 - Evapotranspiração de referência calculada através da distribuição Beta para as pentadas do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	EVAPOTRANSPIRACAO DE REFERENCIA (mm/dia)					
	PERIODO					
	M(5)1	M(5)2	M(5)3	M(5)4	M(5)5	M(5)6
5	3,3	2,5	3,0	3,1	3,2	3,3
10	3,7	3,0	3,2	3,4	3,4	3,5
20	4,0	3,4	3,6	3,7	3,7	3,8
25	4,1	3,6	3,8	3,8	3,9	4,0
30	4,3	3,8	4,0	3,9	4,0	4,1
40	4,5	4,1	4,3	4,1	4,3	4,3
50	4,7	4,4	4,5	4,4	4,5	4,5
60	4,9	4,7	4,8	4,5	4,7	4,7
70	5,1	5,0	5,0	4,7	5,0	4,9
75	5,2	5,1	5,1	4,8	5,1	5,0
80	5,3	5,2	5,3	5,0	5,2	5,1
90	5,5	5,5	5,5	5,2	5,4	5,3
95	5,7	5,6	5,6	5,4	5,5	5,5

Tabela 9 - Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Beta para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	EVAPOTRANSPIRACAO DE REFERENCIA (mm/dia)					
	PERIODO					
	M(10)1	M(10)2	M(10)3	M(15)1	M(15)2	M(30)
5	3,3	3,4	3,5	3,2	3,6	3,6
10	3,5	3,5	3,7	3,5	3,8	3,8
20	3,8	3,8	4,0	3,9	4,0	4,1
25	3,9	3,9	4,1	4,0	4,1	4,1
30	4,1	4,0	4,2	4,1	4,2	4,2
40	4,3	4,2	4,3	4,3	4,3	4,4
50	4,5	4,4	4,5	4,5	4,5	4,5
60	4,8	4,6	4,6	4,7	4,6	4,6
70	5,0	4,8	4,8	4,9	4,7	4,7
75	5,1	4,9	4,9	5,0	4,8	4,8
80	5,2	5,0	5,0	5,1	4,8	4,8
90	5,4	5,2	5,2	5,3	5,0	5,0
95	5,5	5,3	5,3	5,4	5,1	5,0

projetos mais racionais e a uma exploração mais otimizada dos recursos hídricos e energéticos.

O período de máxima exigência hídrica das culturas anuais irrigadas não se restringe a um único dia, ou mesmo, três, cinco ou sete dias. Parece razoável admitir um período variável entre 10 e 30 dias. JENSEN (1974) considera que este período, geralmente, compreende duas ou três semanas. Analisando a Tabela 10, verifica-se que, de forma geral, à medida que diminui o período, aumenta o valor da evapotranspiração de referência para um mesmo nível de probabilidade, no caso, 75% . A maior diferença entre um dos períodos e o período mensal foi de 8,3%, justamente um período de 5 dias (as diferenças variaram de 0,0 a 8,3%). Isto leva a concluir que os sistemas de irrigação dimensionados com base na evapotranspiração de uma pentada são superdimensionados, prejudicando o desempenho e a economia da irrigação. Por outro lado, sistemas dimensionados com base em períodos mensais podem, muitas vezes, estar subdimensionando o sistema, no caso do período de máxima exigência hídrica ser menor que 30 dias. No caso do mês de março, este risco de super e subdimensionamento é real, porém, em pequenas proporções, pois a amplitude e o coeficiente de variação dos valores da evapotranspiração são reduzidos, estando os dados agrupados. Além disso, os procedimentos de estimativa da evapotranspiração trazem sempre um grau de imprecisão que, dependendo do método e da disponibilidade

Tabela 10 - Relação entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade em um determinado período e a evapotranspiração a 75% de probabilidade para o período de 30 dias, para o mês de março.

PERIODO	ET ₀ a 75% (mm/dia)	% em relação a ET ₀ a 75% do período de 30 dias
M(5)1	5,2	8,3%
M(5)2	5,1	6,3
M(5)3	5,1	6,3
M(5)4	4,8	0,0
M(5)5	5,1	6,3
M(5)6	5,0	4,2
M(10)1	5,1	6,3
M(10)2	4,9	2,1
M(10)3	4,9	2,1
M(15)1	5,0	4,2
M(15)2	4,8	0,0
M(30)	4,8	0,0

e confiabilidade dos dados meteorológicos, superam, em muito, este nível de 8,3%.

O valor da evapotranspiração que serve de base para o dimensionamento de sistemas de irrigação depende da duração do período de máxima exigência hídrica da cultura e do nível de probabilidade desejado para as condições específicas do projeto em consideração. O critério recomendável deve estar baseado em análise econômica, considerando os prejuízos associados à redução da quantidade e qualidade da produção decorrentes da deficiência hídrica, e no aumento de custos do sistema para satisfazer níveis mais elevados de probabilidade. Normalmente, níveis mais elevados de probabilidade são selecionados para culturas de maior valor econômico e condição de reduzida quantidade de água disponível no solo (PRUITT et alii, 1972; JENSEN, 1974).

Em condições de irrigação tipicamente suplementar, como se verifica na região centro-sul do Brasil e, conseqüentemente, na região de Piracicaba, SP, dificilmente a economia dos projetos de irrigação justifica a escolha de níveis de probabilidade superiores a 90%. Na grande prática, os valores usuais adotados variam de 50 a 75%, dependendo das implicações econômicas associadas ao projeto em consideração. DOORENBOS & PRUITT (1984) admitem que na maioria das regiões irrigadas esses níveis estejam entre 75 e 80%. O que se verifica, a nível de Brasil, é a adoção da média dos valores estimados da

evapotranspiração como parâmetro de dimensionamento. Na distribuição Normal a média corresponde ao nível de 50% de probabilidade, dando-se a impressão de que este critério subdimensiona o sistema de irrigação. Para verificar tal suposição, foi montada a Tabela 11, onde se tem a relação entre a evapotranspiração esperada ao nível de 75%, calculada pela distribuição Beta, e a evapotranspiração média, para os vários períodos em estudo. Observa-se que os valores médios estão muito próximos do nível de 50% de probabilidade. Além disso, verifica-se que a faixa de variação fica entre 9,1 e 18,6% , que é um intervalo relativamente pequeno, caso se considere eventuais erros desta ordem. Logo, considerando que o procedimento mais adequado é aquele que adota a evapotranspiração em torno do nível de 75% de probabilidade, verifica-se que existe um subdimensionamento ao se utilizar o valor médio, porém, é de significância relativa.

Após esta discussão, pode-se dizer que, de uma forma geral, para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação, o valor da evapotranspiração de referência deve ser escolhido em função de níveis de probabilidade de ocorrência em torno de 75% e para um período coerente com a duração do intervalo de máxima exigência hídrica da cultura a ser irrigada. Porém, sempre que possível, deve-se fazer uma análise criteriosa dos fatores envolvidos (cultura, aspectos econômicos, disponibilidade de água, etc) antes de se adotar um determinado valor de

Tabela 11 - Estudo comparativo entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade e a evapotranspiração média, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias do mês de março.

PERIODO	ETo a 75% (mm/dia)	ETo media (mm/dia)	ETo media probabili- dade (%)	ETo a 75% ETo media
M(5)1	5,2	4,6	45	1,130
M(5)2	5,1	4,3	47	1,186
M(5)3	5,1	4,4	45	1,159
M(5)4	4,8	4,3	47	1,116
M(5)5	5,1	4,5	50	1,133
M(5)6	5,0	4,5	50	1,111
M(10)1	5,1	4,5	50	1,133
M(10)2	4,9	4,4	50	1,114
M(10)3	4,9	4,5	50	1,089
M(15)1	5,0	4,5	50	1,111
M(15)2	4,8	4,4	45	1,091
M(30)	4,8	4,4	40	1,091

evapotranspiração para fins de projeto.

Embora se verifique que a evapotranspiração de referência não varia muito, como é o caso da precipitação pluvial, nota-se que se obtém uma série de pequenos desvios ao se proceder à análise e ao uso incorreto das estimativas. Métodos de estimativa pouco precisos e dimensionamento baseado em períodos muito pequenos (5 dias) ou muito grandes (mensal), utilizando sem nenhum critério a média, conduzem, quando juntos, a sistemas de irrigação mal dimensionados e ineficientes.

Para ilustrar o ajuste da distribuição Beta aos dados de evapotranspiração de referência estimados, são apresentadas as Figuras 2 e 3 .

Nas Tabelas 12 e 13 estão os valores de evapotranspiração para os diferentes níveis de probabilidade, obtidos através da distribuição Normal. Os resultados são semelhantes àqueles obtidos utilizando-se a distribuição Beta (Tabelas 8 e 9).

4.1.2. Evapotranspiração de referência para o mês de setembro

As estimativas da evapotranspiração de referência para o mês de setembro encontram-se nas Tabelas 14 e 15. O mês de setembro foi escolhido para exemplificar este estudo por ser, na maioria das vezes, o período onde se concentra a máxima exigência hídrica das

M(5)4

Figura 2 - Evapotranspiração para os diferentes níveis de probabilidade obtida através da distribuição Beta, e evapotranspiração observada para a quarta pentada de março.

Figura 3 - Evapotranspiração para os diferentes níveis de probabilidade obtida através da distribuição Beta, e evapotranspiração observada para a primeira quinzena de março.

Tabela 12 - Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Normal para as pentadas do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	EVAPOTRANSPIRACAO DE REFERENCIA (mm/dia)					
	PERIODO					
	M(5)1	M(5)2	M(5)3	M(5)4	M(5)5	M(5)6
5	3,5	2,8	3,1	3,2	3,2	3,4
10	3,8	3,1	3,4	3,5	3,5	3,6
20	4,1	3,5	3,8	3,8	3,8	3,9
25	4,2	3,7	3,9	3,9	4,0	4,0
30	4,3	3,8	4,0	4,0	4,1	4,1
40	4,5	4,1	4,2	4,2	4,3	4,3
50	4,6	4,3	4,4	4,3	4,4	4,5
60	4,8	4,5	4,6	4,5	4,6	4,6
70	5,0	4,8	4,9	4,7	4,8	4,8
75	5,1	4,9	5,0	4,8	4,9	4,9
80	5,2	5,1	5,1	4,9	5,1	5,0
90	5,5	5,5	5,5	5,2	5,4	5,3
95	5,8	5,8	5,8	5,4	5,6	5,5

Tabela 13 - Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Normal para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	EVAPOTRANSPIRACAO DE REFERENCIA (mm/dia)					
	PERIODO					
	M(10)1	M(10)2	M(10)3	M(15)1	M(15)2	M(30)
5	3,4	3,4	3,6	3,4	3,7	3,7
10	3,6	3,6	3,8	3,7	3,9	3,9
20	3,9	3,9	4,0	3,9	4,1	4,1
25	4,0	4,0	4,1	4,0	4,1	4,1
30	4,1	4,1	4,2	4,1	4,2	4,2
40	4,3	4,2	4,3	4,3	4,3	4,3
50	4,5	4,4	4,5	4,5	4,4	4,4
60	4,6	4,5	4,6	4,6	4,5	4,5
70	4,8	4,7	4,7	4,8	4,6	4,7
75	4,9	4,8	4,8	4,9	4,7	4,7
80	5,0	4,9	4,9	5,0	4,8	4,8
90	5,3	5,2	5,1	5,3	5,0	5,0
95	5,6	5,4	5,3	5,5	5,1	5,1

Tabela 14 - Valores da evapotranspiração de referência para as pentadas do mês de setembro, para um período de 30 anos.

Evapotranspiração de referência (mm/dia)					
PERIODO					
S(5)1	S(5)2	S(5)3	S(5)4	S(5)5	S(5)6
5,2	5,8	5,5	5,2	5,4	5,5
5,1	5,3	5,3	5,2	5,3	5,4
5,0	5,2	5,0	5,2	4,9	5,1
4,7	5,0	4,9	5,1	4,9	5,1
4,6	4,9	4,9	4,9	4,9	5,0
4,5	4,8	4,9	4,9	4,8	4,7
4,5	4,7	4,8	4,8	4,7	4,6
4,4	4,6	4,6	4,8	4,7	4,6
4,4	4,6	4,6	4,8	4,6	4,5
4,3	4,5	4,4	4,7	4,5	4,5
4,3	4,4	4,4	4,6	4,4	4,5
4,3	4,3	4,3	4,6	4,3	4,5
4,3	4,3	4,2	4,5	4,3	4,4
4,3	4,3	4,2	4,4	4,2	4,1
4,1	4,1	4,0	4,4	4,2	4,1
4,0	4,1	4,0	4,3	4,2	4,1
3,9	3,9	3,9	4,2	4,1	4,1
3,8	3,9	3,9	4,1	4,0	4,0
3,7	3,8	3,9	4,1	4,0	4,0
3,7	3,8	3,9	4,0	3,8	4,0
3,6	3,8	3,8	3,9	3,7	3,9
3,5	3,8	3,8	3,8	3,7	3,9
3,5	3,8	3,7	3,8	3,7	3,8
3,5	3,5	3,7	3,7	3,7	3,7
3,5	3,5	3,7	3,6	3,4	3,7
3,5	3,4	3,5	3,6	3,4	3,6
3,1	3,2	3,4	3,3	3,3	3,5
3,1	3,2	2,8	2,9	3,1	3,3
2,9	3,1	2,6	2,7	3,1	2,9
2,6	2,7	2,4	2,5	2,9	2,1

Tabela 15 - Valores da evapotranspiração de referência para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, para um intervalo de 30 anos.

Evapotranspiração de referência (mm/dia)					
PERIODO					
S(10)1	S(10)2	S(10)3	S(15)1	S(15)2	S(30)
5,4	5,4	5,4	4,9	4,9	4,9
5,1	5,0	4,6	4,9	4,8	4,7
4,9	5,0	4,6	4,7	4,7	4,5
4,6	4,9	4,5	4,7	4,6	4,5
4,5	4,8	4,5	4,7	4,6	4,5
4,4	4,6	4,5	4,6	4,6	4,5
4,4	4,5	4,4	4,6	4,5	4,4
4,3	4,4	4,4	4,4	4,5	4,4
4,3	4,4	4,3	4,3	4,5	4,4
4,3	4,4	4,3	4,3	4,4	4,4
4,3	4,4	4,3	4,3	4,4	4,3
4,3	4,4	4,3	4,3	4,3	4,2
4,2	4,4	4,3	4,2	4,2	4,2
4,2	4,2	4,2	4,1	4,2	4,2
4,1	4,2	4,2	4,1	4,1	4,2
4,1	4,2	4,2	4,0	4,1	4,1
4,0	4,1	4,2	4,0	4,1	4,1
3,9	4,1	4,1	4,0	4,0	4,1
3,8	4,1	4,1	4,0	4,0	4,1
3,8	4,0	4,0	3,9	4,0	4,0
3,8	3,9	4,0	3,8	4,0	4,0
3,8	3,9	3,9	3,8	4,0	4,0
3,7	3,9	3,9	3,7	3,9	4,0
3,7	3,9	3,9	3,7	3,9	3,9
3,7	3,8	3,8	3,7	3,9	3,8
3,7	3,7	3,8	3,5	3,8	3,8
3,6	3,7	3,8	3,5	3,8	3,6
3,3	3,3	3,7	3,5	3,8	3,5
3,2	2,8	3,4	3,3	3,5	3,5
2,6	2,5	2,9	2,6	3,3	3,2

culturas irrigadas plantadas em abril ou maio, da mesma forma que o mês de março seria para as culturas plantadas em torno de outubro.

Na Tabela 16 encontram-se os parâmetros estatísticos dos dados de evapotranspiração para os diferentes períodos, onde se verifica que, à semelhança de março, as estimativas têm uma pequena amplitude de variação e pequena variação, conforme indicam os coeficientes de variação.

Os parâmetros da função densidade de probabilidade da distribuição Beta encontram-se na Tabela 17, sendo que todos os períodos apresentam $p > 1$ e $q > 1$, indicando que a curva tem um pico, com exceção da quarta pentada que apresenta $p > 1$ e $q < 1$, tendo a curva a forma de um J, conforme pode ser observado na Figura 4.

Aplicando-se a distribuição Beta aos dados da evapotranspiração para o mês de setembro, obtiveram-se os diferentes níveis de probabilidades de ocorrência, para os vários períodos analisados (Tabelas 18 e 19), à semelhança do que foi feito para o mês de março.

Comparando os valores da evapotranspiração dos diferentes períodos, para um mesmo nível de probabilidade, verifica-se a mesma tendência observada em março, de aumento do valor da estimativa com a redução do número de dias. Em setembro, para o nível de 75% de probabilidade (Tabela 20), a variação dos valores da evapotranspiração em relação ao valor mensal, ficou entre

Tabela 16 - Parâmetros estatísticos referentes aos dados de evapotranspiração do mês de setembro, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias, de um intervalo de 30 anos.

PERIODO	AMPLI- TUDE (mm/dia)	MEDIA (mm/dia)	DESVIO PADRAO	VARIANCIA	COEF. DE VARIACAO (%)
S(5)1	2,7	4,0	0,649	0,421	16,3
S(5)2	3,1	4,1	0,703	0,494	17,0
S(5)3	3,1	4,1	0,721	0,520	17,5
S(5)4	2,8	4,2	0,727	0,528	17,2
S(5)5	2,5	4,1	0,648	0,419	15,7
S(5)6	3,4	4,2	0,705	0,497	16,9
S(10)1	2,8	4,1	0,552	0,305	13,6
S(10)2	2,9	4,2	0,605	0,366	14,5
S(10)3	2,5	4,2	0,432	0,186	10,4
S(15)1	2,3	4,1	0,507	0,257	12,4
S(15)2	1,6	4,2	0,375	0,141	9,0
S(30)	1,7	4,1	0,368	0,135	8,9

Tabela 17 - Parâmetros p e q da distribuição Beta para os dados de evapotranspiração do mês de setembro, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias.

PERIODO	$\hat{p}$	$\hat{q}$
S(5)1	1,739336	1,514041
S(5)2	1,747549	2,000983
S(5)3	1,889252	1,599939
S(5)4	1,480274	0,848578
S(5)5	1,258178	1,319413
S(5)6	2,700321	1,716747
S(10)1	2,723676	2,527829
S(10)2	2,700001	1,907332
S(10)3	3,620399	3,616995
S(15)1	2,397844	1,422121
S(15)2	1,961177	1,486335
S(30)	2,371713	1,961099

Figura 4 - Função densidade da distribuição Beta aplicada à evapotranspiração para a quarta pentada do mês de setembro.

Tabela 18 - Evapotranspiração de referência calculada através da distribuição Beta para as pentadas do mês de setembro, em função dos diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	EVAPOTRANSPIRACAO DE REFERENCIA (mm/dia)					
	PERIODO					
	S(5)1	S(5)2	S(5)3	S(5)4	S(5)5	S(5)6
5	2,9	3,0	2,9	2,9	3,1	2,9
10	3,1	3,2	3,1	3,1	3,3	3,1
20	3,4	3,5	3,4	3,5	3,5	3,5
25	3,5	3,6	3,5	3,7	3,6	3,7
30	3,6	3,7	3,7	3,8	3,7	3,8
40	3,8	3,9	3,9	4,1	3,9	4,0
50	4,0	4,1	4,1	4,3	4,1	4,2
60	4,2	4,3	4,4	4,6	4,4	4,4
70	4,4	4,6	4,6	4,8	4,6	4,6
75	4,5	4,7	4,7	4,9	4,7	4,7
80	4,6	4,8	4,8	5,0	4,8	4,8
90	4,9	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
95	5,0	5,3	5,2	5,2	5,2	5,2

Tabela 19 - Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Beta para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, em função dos diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	EVAPOTRANSPIRACAO DE REFERENCIA (mm/dia)					
	PERIODO					
	S(10)1	S(10)2	S(10)3	S(15)1	S(15)2	S(30)
5	3,1	3,0	3,4	3,0	3,5	3,5
10	3,3	3,3	3,5	3,4	3,6	3,6
20	3,6	3,6	3,8	3,6	3,8	3,8
25	3,7	3,7	3,8	3,7	3,9	3,8
30	3,8	3,8	3,9	3,8	4,0	3,9
40	3,9	4,0	4,0	4,0	4,1	4,0
50	4,1	4,2	4,2	4,1	4,2	4,1
60	4,2	4,4	4,3	4,3	4,3	4,3
70	4,4	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4
75	4,5	4,6	4,5	4,5	4,5	4,4
80	4,6	4,7	4,6	4,6	4,6	4,5
90	4,8	5,0	4,9	4,7	4,7	4,6
95	5,0	5,1	5,1	4,8	4,8	4,7

Tabela 20 - Relação entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade em um determinado período e a evapotranspiração a 75% de probabilidade para o período de 30 dias, para o mês de setembro.

PERIODO	ETo a 75% (mm/dia)	% em relacao a ETo a 75% do periodo de 30 dias
S(5)1	4,5	2,3%
S(5)2	4,7	6,8
S(5)3	4,7	6,8
S(5)4	4,9	11,4
S(5)5	4,7	6,8
S(5)6	4,7	6,8
S(10)1	4,5	2,3
S(10)2	4,6	4,5
S(10)3	4,5	2,3
S(15)1	4,5	2,3
S(15)2	4,5	2,3
S(30)	4,4	0,0

2,3 e 11,4%.

Fazendo a relação entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade e o valor médio, verifica-se uma variação mínima de 7,1% e uma variação máxima de 16,7% (Tabela 21).

As figuras 5 e 6 ilustram o ajuste entre os dados observados de evapotranspiração e aqueles estimados segundo a distribuição Beta.

Os valores de ETo para os diferentes níveis de probabilidade, segundo a distribuição Normal, encontram-se nas Tabelas 22 e 23, sendo bastante próximos daqueles encontrados através da distribuição Beta.

Os resultados obtidos em setembro são coerentes com aqueles obtidos em março, o que vem a confirmar as afirmações e as recomendações já efetuadas, e que valem, também, para setembro.

Tabela 21 - Estudo comparativo entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade e a evapotranspiração média, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias do mês de setembro.

PERIODO	ETo a 75% (mm/dia)	ETo media (mm/dia)	ETo media probabili- dade (%)	ETo a 75% ETo media
S(5)1	4,5	4,0	50	1,125
S(5)2	4,7	4,1	50	1,146
S(5)3	4,7	4,1	50	1,146
S(5)4	4,9	4,2	45	1,167
S(5)5	4,7	4,1	50	1,146
S(5)6	4,7	4,2	50	1,119
S(10)1	4,5	4,1	50	1,098
S(10)2	4,6	4,2	50	1,095
S(10)3	4,5	4,2	50	1,071
S(15)1	4,5	4,1	50	1,098
S(15)2	4,5	4,2	50	1,071
S(30)	4,4	4,1	50	1,073

S(5)4

Figura 5 - Evapotranspiração para os diferentes níveis de probabilidade obtida através da distribuição Beta, e evapotranspiração observada para a quarta pentada de setembro.

S(15)1

Figura 6 - Evapotranspiração para os diferentes níveis de probabilidade obtida através da distribuição Beta, e evapotranspiração observada para a primeira quinzena do mês de setembro.

Tabela 22 - Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Normal para as pentadas do mês de setembro, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	EVAPOTRANSPIRACAO DE REFERENCIA (mm/dia)					
	PERIODO					
	S(5)1	S(5)2	S(5)3	S(5)4	S(5)5	S(5)6
5	2,9	3,0	2,9	3,0	3,1	3,0
10	3,2	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3
20	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6	3,6
25	3,6	3,6	3,6	3,7	3,7	3,7
30	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8
40	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0
50	4,0	4,1	4,1	4,2	4,1	4,2
60	4,2	4,3	4,3	4,4	4,3	4,3
70	4,3	4,5	4,5	4,6	4,5	4,5
75	4,4	4,6	4,6	4,7	4,6	4,6
80	4,5	4,7	4,7	4,8	4,7	4,8
90	4,8	5,0	5,0	5,2	5,0	5,1
95	5,1	5,3	5,3	5,4	5,2	5,3

Tabela 23 - Evapotranspiração de referência obtida através da distribuição Normal para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	EVAPOTRANSPIRACAO DE REFERENCIA (mm/dia)					
	PERIODO					
	S(10)1	S(10)2	S(10)3	S(15)1	S(15)2	S(30)
5	3,2	3,2	3,4	3,2	3,6	3,5
10	3,4	3,4	3,6	3,4	3,7	3,7
20	3,6	3,7	3,8	3,7	3,9	3,8
25	3,7	3,8	3,9	3,7	3,9	3,9
30	3,8	3,8	3,9	3,8	4,0	3,9
40	3,9	4,0	4,0	4,0	4,1	4,0
50	4,1	4,2	4,2	4,1	4,2	4,1
60	4,2	4,3	4,3	4,2	4,3	4,2
70	4,4	4,5	4,4	4,3	4,4	4,3
75	4,4	4,6	4,5	4,4	4,4	4,4
80	4,5	4,7	4,5	4,5	4,5	4,4
90	4,8	4,9	4,7	4,7	4,7	4,6
95	5,0	5,2	4,9	4,9	4,8	4,7

4.2. Precipitação pluvial

O teste de Kolmogorov-Smirnov foi aplicado às distribuições Normal e Mista, para verificar se as mesmas se ajustavam aos dados de precipitação pluvial dos meses de março e setembro. A distribuição Normal não forneceu resultados estatisticamente significativos para os períodos analisados. Já a distribuição Mista utilizando a distribuição Gama, teve a hipótese H_0 aceita em todos os períodos analisados, ao nível de significância de 5%, estando, portanto, apta para representar os dados de precipitação de ambos os meses estudados.

4.2.1. Precipitação pluvial para o mês de março

O mês de março é o período que sucede à estação chuvosa para a região de Piracicaba, SP, conforme pode ser verificado em OMETTO (1989). É, também, o período de máxima exigência hídrica de grande número das culturas plantadas em outubro, pois coincide com os estádios de maior necessidade de água das mesmas (floração, enchimento dos grãos, etc.). Os valores da precipitação para os diferentes períodos encontram-se ordenados de forma decrescente nas Tabelas 24 e 25.

Na Tabela 26 estão alguns parâmetros estatísticos referentes aos dados de precipitação para os diferentes períodos. Analisando estes valores, verifica-se

Tabela 24 - Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para as pentadas do mês de março, para um período de 71 anos.

PRECIPITACAO PLUVIOMETRICA OBSERVADA (mm)					
PERIODO					
M(5)1	M(5)2	M(5)3	M(5)4	M(5)5	M(5)6
107,6	150,8	184,3	122,1	98,6	123,8
91,7	95,4	124,7	103,1	96,5	99,8
88,3	79,6	86,1	85,6	80,8	78,4
84,3	78,4	83,0	84,5	62,4	68,7
84,0	77,2	82,6	82,0	60,8	63,9
84,0	72,6	71,4	79,8	57,7	60,0
78,5	70,5	63,2	69,9	55,5	56,6
77,2	67,8	61,1	53,3	50,0	50,0
73,5	65,5	54,8	49,4	42,9	47,7
72,2	59,6	50,8	46,8	41,8	47,5
69,8	59,2	48,9	44,9	39,7	37,2
64,2	54,9	47,2	40,8	38,5	36,3
63,2	49,4	46,0	38,1	38,5	35,7
53,9	43,6	40,5	38,1	37,8	33,7
53,6	42,5	38,8	36,5	34,3	33,5
52,4	40,7	37,2	36,4	34,0	32,5
48,3	40,7	37,1	33,8	32,7	32,1
43,8	34,6	36,5	33,5	32,2	31,9
43,1	34,0	36,2	32,3	30,9	30,4
39,1	33,6	35,2	32,2	27,3	29,7
38,1	30,2	33,0	31,1	26,0	29,0
36,8	29,7	32,7	30,2	25,5	28,8
33,0	26,5	31,5	29,2	19,0	28,0
22,8	26,0	31,1	26,0	18,9	27,5
19,5	23,6	30,8	25,9	18,1	25,7
16,9	20,4	28,2	21,6	16,4	25,3
14,1	19,8	28,0	18,3	15,1	24,5
13,5	19,5	26,7	17,0	12,1	22,0

Tabela 25 - Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, para um intervalo de 71 anos.

PRECIPITACAO PLUVIAL OBSERVADA (mm)					
PERIODO					
M(10)1	M(10)2	M(10)3	M(15)1	M(15)2	M(30)
215,0	268,8	162,5	243,9	177,1	329,0
162,4	227,8	132,2	232,3	150,6	320,8
160,9	122,1	130,7	222,0	149,2	311,4
133,2	118,4	123,8	189,1	143,7	301,3
114,3	118,3	114,3	175,5	135,9	269,8
111,8	110,4	107,2	150,7	131,7	225,6
111,7	105,3	89,8	150,6	130,7	214,4
108,7	93,3	79,7	138,2	130,0	206,7
96,0	86,3	78,4	136,9	126,2	206,2
95,4	84,1	75,6	132,2	122,1	203,1
92,9	83,0	73,2	131,2	105,7	202,4
92,2	81,9	68,9	122,3	100,5	200,8
87,5	81,0	62,4	115,8	90,1	196,2
84,7	78,6	60,8	115,7	89,5	194,5
84,3	71,4	60,2	114,3	89,4	194,3
82,7	69,7	60,0	113,5	89,4	189,6
77,2	67,2	57,9	113,0	88,7	185,6
76,5	66,0	57,8	113,0	86,1	184,3
76,3	63,7	57,2	111,6	85,1	183,2
76,3	63,2	55,9	110,0	78,7	182,9
72,7	63,0	55,3	109,8	76,1	173,8
72,2	62,2	55,2	107,7	75,6	173,5
69,8	60,4	55,0	97,9	75,0	169,9
64,5	56,9	48,5	96,8	72,3	167,6
61,5	54,8	48,0	96,6	72,0	164,0
59,6	54,4	47,9	90,5	71,6	162,3
52,6	49,7	47,5	81,8	71,0	160,4
50,7	49,4	43,9	81,3	68,9	160,1
45,4	47,4	39,7	75,8	64,2	155,2
45,0	45,6	37,5	73,1	61,8	152,9
43,1	43,7	35,9	72,2	59,2	152,1
43,0	40,8	35,0	70,7	56,5	147,6

Tabela 25 - Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, para um intervalo de 71 anos.

39,3	40,2	34,0	70,6	56,0	140,9
39,1	40,1	32,5	69,8	55,3	140,0
38,8	39,4	31,9	67,5	55,3	139,8
34,7	39,3	27,5	61,9	54,6	139,8
34,1	38,6	27,3	61,5	54,0	136,6
33,6	36,2	26,5	54,3	47,5	132,3
30,1	35,2	22,0	52,8	44,2	130,7
28,8	34,9	21,5	52,6	43,9	123,8
28,6	34,6	19,6	51,8	43,1	117,2
27,7	34,5	18,2	51,7	41,7	112,8
26,9	33,1	17,4	51,2	40,5	107,0
26,0	31,8	17,2	50,4	39,7	105,6
23,7	30,2	14,8	48,2	39,1	102,8
21,2	30,1	12,8	46,4	38,1	98,0
20,7	30,0	12,1	43,1	37,5	96,8
20,6	29,1	12,0	42,1	37,2	96,5
18,6	25,8	10,3	40,4	35,7	95,7
18,2	24,9	9,2	38,8	34,7	85,5
17,7	23,8	9,2	36,4	33,5	85,1
17,3	23,4	8,9	36,1	33,0	84,7
15,0	22,4	7,8	34,8	32,5	84,7
13,8	20,4	7,7	34,1	32,3	84,5
13,2	20,3	3,8	34,0	31,2	83,0
13,1	19,5	2,6	29,8	26,5	74,6
12,9	14,6	1,5	29,6	22,0	65,5
10,0	14,5	1,0	27,7	19,4	62,4
9,0	14,1	1,0	23,7	15,0	56,0
7,1	10,5	1,0	21,9	14,7	55,6
6,1	9,3	1,0	21,2	12,0	47,1
5,3	7,2	0,0	20,6	11,7	47,1
3,7	4,0	0,0	19,6	9,2	46,7
3,7	4,0	0,0	18,2	9,0	45,5
3,5	3,2	0,0	14,3	8,7	42,3
1,0	2,2	0,0	13,2	7,8	41,6
1,0	1,0	0,0	12,9	7,8	32,6
0,0	1,0	0,0	12,0	7,5	30,6
0,0	0,0	0,0	11,4	3,4	23,4
0,0	0,0	0,0	6,1	3,0	17,8
0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	11,8

Tabela 26 - Parâmetros estatísticos referentes aos dados da pre
cipitação pluvial do mês de março, para os períodos
de 5, 10, 15 e 30 dias, de um intervalo de 71 anos.

PERIODO	AMPLI- TUDE (mm)	MEDIA (mm)	DESVIO PADRAO	VARIANCIA	COEF. DE VARIACAO (%)
M(5)1	107,6	24,8	30,067	904,030	121,2
M(5)2	150,8	24,2	28,919	836,297	119,5
M(5)3	184,3	27,0	31,157	970,735	115,4
M(5)4	122,1	22,4	26,869	721,932	120,0
M(5)5	98,6	17,4	23,740	563,574	136,4
M(5)6	123,8	20,2	25,075	628,753	124,1
M(10)1	215,0	49,1	44,404	1971,731	90,4
M(10)2	268,8	49,5	46,149	2129,701	93,2
M(10)3	162,5	37,6	37,407	1399,257	99,5
M(15)1	239,9	76,1	54,786	3001,545	72,0
M(15)2	177,1	60,0	41,991	1763,267	70,0
M(30)	317,2	136,1	73,391	5386,256	53,9

que existe uma grande amplitude de variação dos dados e que os coeficientes de variação variaram de 53,9 a 136,4%, indicando que os dados estão muito dispersos e que o estudo de frequência de distribuição é bastante oportuno.

Comparando os coeficientes de variação da evapotranspiração para o mês de março (variaram de 9,6 a 21,7%) com os da precipitação para o mesmo mês (variaram de 53,9 a 136,4%), verifica-se o porquê da afirmação de que a precipitação é o parâmetro mais variável. Além disto, verifica-se que os dados de precipitação requerem, necessariamente, um estudo de frequência de distribuição.

A distribuição Mista foi aplicada aos dados de precipitação, sendo que os parâmetros α e β da distribuição Gama estão relacionados na Tabela 27.

As Tabelas 28 e 29 fornecem as probabilidades da precipitação ser igual ou maior que o valor apresentado, nos níveis de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90 e 95% . Assim, para o período mensal, existe a probabilidade de 75% de que a precipitação seja igual ou maior que 76,4 mm. Outra forma de interpretação consiste em dizer que em três de cada quatro anos, a precipitação será igual ou maior que 76,4 mm.

O valor da precipitação dependente, geralmente recomendado para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação, é aquele correspondente ao nível de 75% de probabilidade (MAROUELLI & SEDIYAMA, 1987 ; MATUTE

Tabela 27 - Parâmetros α e β da distribuição Gama utilizada na distribuição Mista, para os dados de precipitação plu-
vial do mês de março, para os pe-
ríodos de 5, 10, 15 e 30 dias.

PERÍODO	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$
M(5)1	0,83803	35,68192
M(5)2	1,13268	27,62391
M(5)3	0,99383	31,64274
M(5)4	1,16475	24,00183
M(5)5	0,55312	49,51896
M(5)6	1,06971	26,33475
M(10)1	1,20377	43,19957
M(10)2	1,32067	39,10905
M(10)3	1,07027	40,89928
M(15)1	1,78534	42,62161
M(15)2	1,70891	35,63615
M(30)	2,80641	48,50878

Tabela 28 - Precipitação pluvial obtida através da distribuição Mista para as pentadas do mês de março, em função dos diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABILI- DADE (%)	PRECIPITACAO PLUVIAL DEPENDENTE (mm)					
	PERIODO					
	M(5)1	M(5)2	M(5)3	M(5)4	M(5)5	M(5)6
5	89,1	83,1	91,9	74,4	82,6	74,0
10	65,8	68,0	68,0	57,3	54,3	55,0
20	42,7	42,4	45,9	38,8	28,5	36,1
25	35,4	35,9	38,8	33,0	21,1	30,0
30	29,9	30,4	33,1	28,2	15,2	25,0
40	20,4	21,8	24,0	20,6	7,2	17,2
50	13,5	14,9	17,0	14,6	2,5	10,8
60	8,1	9,1	11,2	9,4	1	5,6
70	3,9	4,0	6,4	4,8	0	1
75	2,1	1,4	2,2	2,6	0	0
80	1	0	2,2	1,7	0	0
90	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0

Tabela 29 - Precipitação pluvial obtida através da distribuição Mista para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de março, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	PRECIPITACAO PLUVIAL DEPENDENTE (mm)					
	PERIODO					
	M(10)1	M(10)2	M(10)3	M(15)1	M(15)2	M(30)
5	145,4	160,3	121,9	202,3	151,7	293,6
10	111,8	109,2	93,3	152,3	122,4	248,4
20	79,7	79,1	63,7	115,7	92,4	195,7
25	69,1	69,2	54,3	103,4	82,3	178,9
30	60,4	61,0	46,5	93,0	73,8	164,5
40	46,7	47,8	34,2	76,2	59,3	140,5
50	35,7	37,3	24,6	62,5	48,9	120,4
60	26,4	28,4	16,6	50,5	39,1	102,2
70	18,4	20,4	9,8	39,6	30,2	85,0
75	14,6	16,7	6,6	34,3	25,9	76,4
80	11,0	13,0	3,6	28,5	21,6	67,5
90	3,8	5,6	0	18,1	12,6	47,7
95	0	1	0	11,8	7,1	34,7

& HACHEM, 1983). Outros autores recomendam níveis de probabilidade entre 75 e 80% (DOORENBOS & PRUITT, 1984), ou até mesmo variando de 50 a 90% (DASTANE, 1974), dependendo da necessidade da cultura, seu valor econômico, estágio de desenvolvimento e da disponibilidade de recursos hídricos, ou seja, dependendo de um estudo criterioso. Estes níveis de probabilidade representam a quantidade de precipitação igual a ou maior que um valor provável que se espera ocorrer, aproximadamente, em três de cada quatro anos. O que se verifica na prática é o uso do valor médio mensal, o que não é um critério recomendável, pois ao se analisar a Tabela 30, é possível constatar que existe uma grande diferença entre a precipitação dependente ao nível de 75% (critério recomendado) e a precipitação média. Nota-se, também, que as precipitações médias para os diferentes períodos estão compreendidas entre os níveis de probabilidade de 28 e 42%, bastante inferiores em relação ao nível recomendado para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação (75%). Isto é decorrente do fato dos dados de precipitação pluvial terem se ajustado a uma distribuição (Mista) que utiliza a distribuição Gama, uma vez que esta é positivamente assimétrica, ou seja, o ramo mais longo da curva fica à direita (Figura 11).

A Tabela 30 permite, ainda, que se verifique que, em termos médios, as probabilidades referentes às precipitações médias dos períodos de 5, 10,

Tabela 30 - Estudo comparativo entre a precipitação pluvial ao nível de 75% e a precipitação pluvial média, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias do mês de março.

PERIODO	PRECIPITACAO		
	a 75% (mm)	MEDIA (mm)	MEDIA probabilidade (%)
M(5)1	2,1	24,9	35
M(5)2	1,4	24,2	37
M(5)3	2,2	27,0	36
M(5)4	2,6	22,4	37
M(5)5	0	17,4	28
M(5)6	0	20,2	36
M(10)1	14,6	49,1	38
M(10)2	16,7	49,5	39
M(10)3	6,6	37,6	37
M(15)1	34,3	76,1	40
M(15)2	25,9	60,0	40
M(30)	76,4	136,1	42

15 e 30 dias, foram de 35, 38, 40 e 42%, respectivamente. Isto revela que à medida que diminui o período, aumenta a diferença entre o nível de probabilidade correspondente à precipitação média e o nível de probabilidade recomendado (75%), ou seja, à medida que diminui o período, maior o erro ao se utilizar a precipitação média para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação.

A análise dos valores de probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial permite que se conclua que a estimativa da exigência em água para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação não deve estar fundamentada no valor mínimo de precipitação (95%), visto que isto resultaria, para a maioria dos anos, num projeto superdimensionado. Por outro lado, também não deve estar baseada na precipitação média, e muito menos na máxima (5%), o que acarretaria um subdimensionamento do projeto de irrigação. O valor de 75% de probabilidade parece bastante razoável, ou mesmo outros valores, sempre pautados numa análise de distribuição dos dados de precipitação e em justificativas racionais.

Pode-se dizer que, de uma maneira geral, o uso de valores de precipitação obtidos em função de períodos coerentes com a duração do intervalo de máxima exigência hídrica da cultura e de níveis de probabilidade em torno de 75%, constitui-se no procedimento mais recomendado para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação.

O ajuste da distribuição Mista aos dados observados de precipitação pode ser visualizado através das Figuras 7 e 8 . Cabe salientar que a probabilidade dos dados observados (distribuição empírica ou natural) foi calculada através da equação de Kimball.

4.2.2. Precipitação pluvial para o mês de setembro

Os dados de precipitação pluvial para o mês de setembro, para períodos de 5, 10, 15 dias e mensal, encontram-se ordenados de forma decrescente nas Tabelas 31 e 32 . Segundo OMETTO (1989) o mês de setembro, para a região de Piracicaba, SP, apresenta precipitação pluvial média mensal de 60 mm, enquanto o mês de março caracteriza-se pelo valor de 136 mm.

Analisando os parâmetros estatísticos dos dados observados, apresentados na Tabela 33, verifica-se uma grande amplitude dos mesmos e elevados valores de coeficiente de variação, variando de 93,6 a 209,0% , caracterizando uma grande dispersão dos dados. Mais uma vez fica evidente a necessidade de se proceder estudos de distribuição de frequência para uma análise criteriosa dos dados.

Comparando os dados de precipitação de março com aqueles de setembro, verifica-se que, embora as amplitudes sejam maiores no primeiro mês, os maiores

M(5)4

Figura 7 - Precipitação pluvial dependente obtida através da distribuição Mista, e precipitação observada para a quarta pentada do mês de março.

Figura 8 - Precipitação pluvial dependente obtida através da distribuição Mista, e precipitação observada para a primeira quinzena do mês de março.

Tabela 31 - Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para as pentadas do mês de sentembro, para um período de 71 anos.

PRECIPITACAO PLUVIAL OBSERVADA (mm)					
S(5)1	S(5)2	PERIODO		S(5)5	S(5)6
		S(5)3	S(5)4		
70,5	99,4	119,9	60,2	70,8	64,0
60,4	76,5	106,5	53,0	54,8	61,6
50,5	59,2	70,0	48,8	47,5	51,3
46,8	52,2	64,2	44,0	39,1	50,7
42,5	48,4	55,0	34,0	38,7	46,9
41,2	41,2	45,8	30,5	34,9	44,9
40,5	38,0	42,1	30,0	30,0	42,0
33,6	32,4	37,3	29,3	29,8	40,6
31,4	31,0	35,1	28,6	27,6	40,5
26,1	30,1	32,2	26,9	25,6	35,9
12,0	28,0	31,8	25,5	23,0	29,2
12,0	25,7	31,6	25,3	22,2	26,6
9,1	23,1	30,2	25,0	20,5	24,0
8,4	19,0	28,2	24,9	19,3	22,8
8,0	18,5	26,0	20,9	13,2	19,0
6,7	14,6	21,8	20,8	12,1	18,7
4,7	14,0	17,0	19,0	11,7	16,6
4,6	12,3	15,2	18,9	10,7	16,6
3,9	12,2	12,2	17,9	10,4	15,4
3,6	10,4	11,2	17,4	10,2	14,5
3,4	9,1	8,8	14,4	9,5	13,6
3,2	8,0	8,6	13,6	9,5	13,6
2,8	7,0	8,0	13,2	9,4	12,0
1,6	6,6	4,6	9,5	9,0	10,2
1,4	6,3	4,3	7,7	8,5	10,1
1,4	6,1	4,0	6,9	7,7	8,1
1,2	4,7	3,1	5,0	7,3	7,0
1,0	4,2	2,7	4,7	6,9	5,3
1,0	3,5	2,2	4,0	6,3	5,2
1,0	2,8	2,0	3,5	6,2	5,0
1,0	1,8	1,4	3,0	5,5	4,7
1,0	1,7	1,4	3,0	5,2	4,6

Tabela 32 - Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, para um intervalo de 71 anos.

PRECIPITACAO PLUVIAL OBSERVADA (mm)					
PERIODO					
S(10)1	S(10)2	S(10)3	S(15)1	S(15)2	S(30)
117,0	150,5	134,8	236,9	148,4	257,4
99,4	119,9	70,8	141,5	107,7	226,4
84,8	88,4	65,3	119,2	93,0	200,5
76,2	83,6	56,6	107,5	88,2	197,4
70,5	74,0	56,2	102,2	84,8	190,4
64,2	68,2	54,8	97,0	78,6	180,6
61,5	67,6	51,3	89,7	68,3	138,2
60,4	64,7	50,8	89,1	62,4	128,7
59,7	64,2	49,3	82,7	61,2	123,6
48,7	51,5	49,0	80,3	59,8	114,0
44,7	51,0	47,5	78,0	58,4	111,3
42,5	50,5	46,9	70,5	56,6	110,2
41,2	46,2	42,0	63,1	55,1	98,6
35,1	43,4	38,7	62,6	51,3	96,4
34,6	42,6	36,5	60,4	50,8	90,4
33,6	41,2	33,5	56,7	49,2	88,7
32,4	35,1	29,8	50,8	46,9	88,0
28,0	34,2	27,6	46,9	45,2	80,3
26,1	31,6	26,6	42,5	45,0	76,4
19,0	30,5	25,6	41,2	41,9	75,6
19,0	30,2	24,0	36,6	40,7	72,9
18,5	29,6	23,5	35,4	39,1	72,7
15,3	28,6	23,0	34,0	36,5	69,0
15,2	26,9	22,8	33,6	34,5	68,6
12,2	26,3	22,3	32,2	30,6	67,9
10,9	25,3	22,2	26,5	30,5	64,0
10,7	25,0	20,5	26,1	29,2	62,5
10,4	20,9	19,3	25,6	26,5	62,2
10,2	19,1	19,0	22,9	25,8	61,3
8,9	12,2	18,7	19,8	25,6	59,8
8,4	11,7	18,5	19,2	24,8	59,3
8,1	11,2	16,6	17,0	24,4	56,4

Tabela 32 - Valores da precipitação pluvial, em ordem decrescente, para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, para um intervalo de 71 anos.

8,0	10,8	13,7	10,2	24,0	52,6
8,0	9,1	13,6	9,5	23,5	51,3
7,4	8,8	13,6	8,9	23,2	50,8
6,6	8,6	13,2	8,8	22,5	48,6
6,3	7,7	13,2	8,6	21,3	46,9
5,2	5,0	12,0	8,5	20,5	44,6
4,7	4,7	11,4	8,5	19,9	42,7
3,4	4,1	11,2	8,0	19,3	40,7
3,1	4,0	11,0	8,0	19,0	36,7
1,4	3,5	11,0	7,4	19,0	36,1
1,0	3,2	10,4	6,3	18,5	35,2
1,0	3,0	10,1	5,2	17,9	33,0
0,0	3,0	10,0	4,7	15,5	31,2
0,0	2,1	9,4	4,6	14,2	29,2
0,0	1,4	8,1	3,6	13,7	28,1
0,0	1,4	7,8	3,3	13,6	24,0
0,0	1,3	5,9	3,1	13,2	23,2
0,0	1,2	5,5	2,7	13,2	23,2
0,0	1,0	5,0	1,4	11,4	22,8
0,0	1,0	4,6	1,4	11,0	21,3
0,0	0,0	3,6	1,0	10,1	19,3
0,0	0,0	2,2	0,0	10,0	16,3
0,0	0,0	1,6	0,0	9,5	15,8
0,0	0,0	1,5	0,0	8,1	15,5
0,0	0,0	1,0	0,0	7,8	13,6
0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	13,3
0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	11,1
0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	9,1
0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	8,7
0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	8,1
0,0	0,0	0,0	0,0	2,3	7,7
0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	5,9
0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	4,1
0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	3,6
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 33 - Parâmetros estatísticos referentes aos dados de precipitação pluvial do mês de setembro, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias, de um intervalo de 71 anos.

PERIODO	AMPLITUDE (mm)	MEDIA (mm)	DESVIO PADRAO	VARIANCIA	COEF. DE VARIACAO (%)
S(5)1	70,5	7,6	15,882	252,243	209,0
S(5)2	99,4	10,5	19,270	371,317	183,5
S(5)3	119,9	12,5	23,785	565,713	190,3
S(5)4	60,2	9,9	14,443	208,595	145,9
S(5)5	70,8	9,3	14,518	210,777	156,1
S(5)6	64,0	11,2	16,820	282,920	150,2
S(10)1	117,0	18,1	26,558	705,310	146,7
S(10)2	150,5	22,4	30,466	928,156	136,0
S(10)3	134,8	20,5	23,054	531,499	112,5
S(15)1	236,9	30,6	42,652	1819,201	139,4
S(15)2	148,4	30,4	28,569	816,170	94,0
S(30)	257,4	61,0	57,111	3261,696	93,6

valores do coeficiente de variação foram apresentados pelo mês de setembro, indicando que neste mês houve maior dispersão dos dados.

A distribuição Mista foi aplicada aos valores observados de precipitação, tendo sido estimados os parâmetros de escala (β) e de forma (α) da distribuição Gama, apresentados na Tabela 34.

As Tabelas 35 e 36 fornecem a precipitação dependente para os níveis de probabilidade de 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90 e 95%, para os diferentes períodos em estudo. Cabe salientar que estes níveis de probabilidade referem-se à probabilidade de ser igual ou superior a um valor provável de precipitação.

Analisando a Tabela 36, verifica-se uma grande diferença entre a precipitação dependente para o nível de 75% e a precipitação média, conforme já havia ocorrido no mês de março. As precipitações médias dos diferentes períodos correspondem a níveis de probabilidade compreendidos entre 26 e 39% , bastante distantes do nível de 75% recomendado.

Ainda, analisando a Tabela 37, verifica-se que, em termos médios, as probabilidades correspondentes às precipitações médias dos períodos de 5, 10, 15 e 30 dias, foram de 30, 35, 36 e 38%, respectivamente. Portanto, para o mês de setembro, também se verificou a tendência de que à medida que diminui o período, aumenta o erro no uso da precipitação média para fins de

Tabela 34 - Parâmetros α e β da distribuição Gama utilizada na distribuição Mista para os dados de precipitação pluvial do mês de setembro, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias.

PERÍODO	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$
S(5)1	0,686670	24,41584
S(5)2	1,150473	20,31772
S(5)3	0,776728	32,64976
S(5)4	0,970447	17,65593
S(5)5	1,354659	12,80959
S(5)6	1,016587	19,56792
S(10)1	1,010951	28,85495
S(10)2	0,834963	36,63967
S(10)3	1,350024	18,90351
S(15)1	0,857676	47,76959
S(15)2	1,340953	24,37651
S(30)	1,135788	55,24731

Tabela 35 - Precipitação pluvial obtida através da distribuição Mista para as pentadas do mês de setembro, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	PRECIPITACAO PLUVIAL DEPENDENTE (mm)					
	PERIODO					
	S(5)1	S(5)2	S(5)3	S(5)4	S(5)5	S(5)6
5	40,1	49,9	62,0	42,6	38,1	48,0
10	25,7	35,1	41,2	30,2	28,2	34,5
20	11,8	19,8	21,4	18,1	18,0	20,7
25	7,8	14,7	15,3	14,2	14,6	16,2
30	4,8	10,5	10,6	11,2	11,5	12,6
40	1	3,5	3,7	6,2	6,6	6,9
50	0	0	0	2,4	2,1	2,4
60	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0

Tabela 36 - Precipitação pluvial obtida através da distribuição Mista para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	PRECIPITACAO PLUVIAL DEPENDENTE (mm)					
	PERIODO					
	S(10)1	S(10)2	S(10)3	S(15)1	S(15)2	S(30)
5	73,3	86,9	64,5	116,5	90,1	178,9
10	53,6	63,1	50,0	84,8	67,1	138,4
20	33,0	39,5	35,2	53,8	49,2	98,2
25	26,6	32,0	30,3	43,9	43,0	85,3
30	21,4	26,0	26,2	35,9	37,8	74,4
40	12,9	17,0	19,7	23,7	29,5	57,3
50	6,3	10,0	14,3	14,6	22,8	43,9
60	1	4,7	9,7	7,3	17,1	32,7
70	0	1	5,3	1,8	12,0	23,0
75	0	0	3,1	0	9,6	18,5
80	0	0	1	0	7,3	14,3
90	0	0	0	0	2,2	6,2
95	0	0	0	0	0	2,1

Tabela 37 - Estudo comparativo entre a precipitação pluvial ao nível de 75% de probabilidade e a precipitação pluvial média, para os períodos de 5, 10, 15 e 30 dias do mês de setembro.

PERIODO	PRECIPITACAO		
	a 75% (mm)	MEDIA (mm)	MEDIA probabilidade (%)
S(5)1	0	7,6	26
S(5)2	0	10,5	30
S(5)3	0	12,5	28
S(5)4	0	9,9	32
S(5)5	0	9,3	34
S(5)6	0	11,2	32
S(10)1	0	18,1	33
S(10)2	0	22,4	34
S(10)3	3,1	20,5	39
S(15)1	0	30,6	34
S(15)2	9,8	30,4	39
S(30)	18,5	61,0	38

Tabela 36 - Precipitação pluvial obtida através da distribuição Mista para os períodos de 10, 15 e 30 dias do mês de setembro, em função de diversos níveis de probabilidade de ocorrência.

NIVEL DE PROBABI- LIDADE (%)	PRECIPITACAO PLUVIAL DEPENDENTE (mm)					
	PERIODO					
	S(10)1	S(10)2	S(10)3	S(15)1	S(15)2	S(30)
5	73,3	86,9	64,5	116,5	90,1	178,9
10	53,6	63,1	50,0	84,8	67,1	138,4
20	33,0	39,5	35,2	53,8	49,2	98,2
25	26,6	32,0	30,3	43,9	43,0	85,3
30	21,4	26,0	26,2	35,9	37,8	74,4
40	12,9	17,0	19,7	23,7	29,5	57,3
50	6,3	10,0	14,3	14,6	22,8	43,9
60	1	4,7	9,7	7,3	17,1	32,7
70	0	1	5,3	1,8	12,0	23,0
75	0	0	3,1	0	9,6	18,5
80	0	0	1	0	7,3	14,3
90	0	0	0	0	2,2	6,2
95	0	0	0	0	0	2,1

S(5)4

Figura 9 - Precipitação pluvial dependente obtida através da distribuição Mista, e precipitação observada para a quarta pentada do mês de setembro.

Figura 10 - Precipitação pluvial dependente obtida através da distribuição Mista, e precipitação observada para a primeira quinzena do mês de setembro.

Figura 11 - Função densidade da distribuição Gama utilizada na distribuição Mista aplicada aos dados de precipitação da primeira quinzena do mês de março.

Figura 12 - Função densidade da distribuição Gama utilizada na distribuição Mista aplicada aos dados de precipitação da primeira quinzena do mês de setembro.

Figura 13 - Esquema mostrando o balanço entre a evapotranspiração ao nível de 75% de probabilidade e a precipitação ao nível de 75% de probabilidade, visando a estimativa da exigência em água para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação.

pela eq. (14). Convém frisar que, no caso da evapotranspiração, o nível de probabilidade refere-se à probabilidade de que a evapotranspiração seja menor ou igual a um determinado valor, enquanto que, para a precipitação pluvial, indica a probabilidade de que a precipitação seja maior ou igual a um determinado valor.

O nível de probabilidade e a duração do período de máxima exigência hídrica a serem adotados, dependem de um estudo criterioso das condições específicas de cada projeto de irrigação.

5. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos nesta pesquisa para a região de Piracicaba, SP, estabeleceram-se as seguintes conclusões :

5.1. Baseado no teste de Kolmogorov-Smirnov, o ajuste das distribuições Beta e Normal aos dados da evapotranspiração de referência foi eficiente, em razão da hipótese de nulidade não ter sido rejeitada ao nível de 5% de significância, em nenhum dos períodos estudados aplicando as duas distribuições. A distribuição Beta tem maior capacidade de adaptação e a distribuição Normal apresenta maior facilidade de utilização, daí ser a mais recomendada para fins práticos.

5.2. A relação entre a evapotranspiração estimada pela distribuição Beta ao nível de 75% de probabilidade e o valor médio, variou de 9,1 a 18,6% para o mês de março, e de 7,1% a 16,7% para o mês de setembro.

5.3. Verificou-se que, à medida que diminui o intervalo de dias analisados, aumenta o valor da evapotranspiração de referência para o nível de probabilidade de 75% . Para o mês de março esta variação ficou entre 0,0 e 8,3% e, para setembro, oscilou de 2,3 e 11,4%.

5.4. Analisando-se os parâmetros estatísticos referentes às estimativas da evapotranspiração para os diferentes períodos, bem como as conclusões 5.2. e 5.3., conclui-se que os dados de evapotranspiração apresentaram-se bastante agrupados, porém, o uso de estimativas médias de períodos muito reduzidos (5 dias) ou muito grandes (mensais), associado a métodos pouco precisos de cálculo da evapotranspiração, pode conduzir a erros significativos no dimensionamento de sistemas de irrigação.

5.5. Analisando-se os dados de precipitação para os meses de março e setembro, verificou-se uma grande dispersão dos mesmos, o que tornou evidente a necessidade de se proceder à análise de frequência visando a sua utilização criteriosa.

5.6. A distribuição Mista, utilizando a distribuição Gama, apresentou-se estatisticamente adequada para a estimativa das frequências de distribuição das precipitações, para os períodos de 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias, dos meses de março e setembro.

5.7. O uso da precipitação média para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação resulta em projetos subdimensionados, uma vez que as probabilidades correspondentes às precipitações médias para os diferentes períodos variaram de 28 a 42% para o mês de março, e de 26 a 39% para o mês de setembro, sendo que o valor recomendado está em torno de 75% .

5.8. Tanto para o mês de março como para o mês de setembro, verificou-se que, à medida que diminui o período, aumenta o erro decorrente do uso da precipitação média no dimensionamento de sistemas de irrigação, considerando que o procedimento correto é aquele que utiliza a precipitação dependente em torno de 75% .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, 112(4): 348-68, 1986.

ARRUDA, F.B. & BARROSO, L.F.S. Estimativa do uso de água para fins de projetos de irrigação, em função da evaporação de tanque, em Ribeirão Preto. Bragantia, Campinas, 43(2): 677-82, 1984.

BARGER, R.L. & THOM, H.C.S. Evaluation of drought hazard. Agronomy Journal, Madison, 41(11): 519-26, 1949.

BERNARDO, S. A computerized model to predict supplemental irrigation in tropical and subtropical climate. Logan, 1975. 155p. (PhD. - Utah State University).

BISHNOI, O.P. The behavior of moisture adequacy index and its utilization for exploiting the agricultural potential in Punjab and Haryana. Mausam, New Delhi, 31(1): 157-64, 1980.

- BOSEN, J.F. A formula for aproximation of saturation vapor pressure over water. Monthly Weather Review, Boston, 88(8): 275-6, 1960.
- BRUNT, D. Physical and dynamical meteorology. 2.ed. Cambridge, University Press, 1952. 428p.
- BURMAN, R.D.; NIXON, P.R.; WRIGHT, J.L.; PRUITT, W.O. Water requirements. In: JENSEN, M.E., ed. Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1983. p.189-232. (ASAE Monograph, 3).
- CAMARGO, A.P. de; PINTO, H.S.; BRUNINI, O.; PEDRO JUNIOR, M.I.; ORTOLANI, A.A.; ALFONSI, R.R. Clima do Estado de São Paulo. In: SÃO PAULO (Estado). Secretaria da Agricultura. Zoneamento agrícola do Estado de São Paulo. São Paulo, 1974. v.1, cap.2, p.51-87.
- CAMPOS, H. Estatística experimental não-paramétrica. 4.ed. Piracicaba, ESALQ, 1983. 349p.
- CERVELLINI, A.; SALATI, E.; FERRAZ, E.S.B.; VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K.; DECICO, A.; OMETTO, J.C.; PEDRO JUNIOR, M.J. Análise dos dados meteorológicos de Piracicaba. Piracicaba, ESALQ/USP, 1973. 26p. (Boletim Científico, 36).

- CUENCA, R.H. & NICHOLSON, M.T. Application of Penman equation wind function. Journal of Irrigation and Drainage Division, New York, 108(1): 13-23, 1982.
- DASTANE, N.G. Precipitation efectiva; en la agricultura de regadio. Roma, FAO, 1974. 68p. (FAO. Estudio sobre Riego y Avenamiento, 25).
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome, FAO, 1984. 144p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).
- DOSS, B.D.; BENNEETT, O.L.; ASHLEY, D.A. Moisture use by forage species as related to pan evaporation and net radiation. Soil Science, Baltimore, 98(5): 322-7, 1964.
- FALLS, L.W. The Beta distribution: a statistical model for world cloud cover. Alabama, NASA, 1973. p.1-6. (NASA Technical Memorandum, TMX-64714).
- FRIEDMAN, D.G. & JANES, B.E. Estimation of rainfall probabilities. University of Connecticut, 1957. (Coll. of Agr. Bull., 332).

- FRIZZONE, J.A. Análise de cinco modelos para o cálculo da distribuição e frequência de precipitações na região de Viçosa, MG. Viçosa, 1979. 100p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).
- GALATE, R.S. Estudo das precipitações pluviais no município de Belém - PA, através da distribuição gama. Piracicaba, 1987. 70p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- GOODWIN, J.B. & SANS, L.M.A. Análise de interação da data de plantio, probabilidade de chuvas e consumo de água pela cultura do milho. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 11., Piracicaba, 1976. Anais. Piracicaba, ESALQ, 1976.
- HAAN, C.T. & BARFIELD, B.J. Data simulation from probability distributions. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 16(2): 374-7, 1973.
- HARGREAVES, G.H. Monthly precipitation probabilities for Northeast Brazil. Logan, Dep. of Agricultural and Irrigation Engineering, 1973. 432p.
- HOLTZ, A.C.T. Precipitações. In: _____. Hidrologia de superfície. São Paulo, Edgard Blücher, 1973. p.7-33.

JENSEN, M.E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York, ASCE, 1974. 215p.

MARQUELLI, W.A. & SEDIYAMA, G.C. Balanço hídrico visando ao máximo a precipitação natural. In: SEDIYAMA, G.C. Necessidade de água para os cultivos. Brasília, ABEAS, 1987. p.86-127.

MATUTE, E. & HACHEM, A.M. Necessidade de água para irrigação. Brasília, PROVARZEAS/PROFIR, 1983. 24p.

MILLER, M.E. & WEAVER, C.R. Monthly and annual precipitation probabilities for climatic divisions in Ohio. Wooster, Ohio Agricultural Research and Development Center, 1968. 11p. (Research Bulletin, 1005).

MONTEITH, J.L. Principles of environmental physics. New York, American Elsevier, 1973. 241p.

NIXON, P.R.; LAWLESS, G.P.; RICHARDSON, G.V. Coastal California evapotranspiration frequencies. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, 98(IR2): 182-91, 1972.

OMETTO, J.C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo, Agronômica Ceres, 1981. 440p.

OMETTO, J.C. Registros e estimativas dos parâmetros meteorológicos da região de Piracicaba, SP. Piracicaba, FEALQ, 1989. 76p.

PEARSON, K. Tables of the incomplete Beta-function. London, University College, Biometrika Office, 1934. 494p.

PELTON, W.L.; KING, K.M.; TANNER, C.B. An evaluation of the Thornthwaite and mean temperature methods for determining potential evapotranspiration. Agronomy Journal, Madison, 52(5): 387-95, 1960.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings Royal Society of London, London, A193: 120-146, 1948.

PISKOUNOV, N. Cálculo diferencial e integral. 7.ed. Porto, Livraria Lopes da Silva, 1984. v.1, 457p.

PRUITT, W.O.; OETTINGEN, S. von; MORGAN, D.L. Central California evapotranspiration frequencies. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, 98(IR2): 177-84, 1972.

RAVELO, A.C. & DECKER, W.L. The probability distribution of a soil moisture index. Agricultural Meteorology,

Amsterdam, 20: 301-12, 1979.

REICHARDT, K. A água nos sistemas agrícolas. São Paulo, Manole, 1987. 188p.

SAAD, J.C.C. & SCALOPPI, E.J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., Florianópolis, 1988. Anais. Florianópolis, ABID, 1988a. v.2, p.999-1021.

SAAD, J.C.C. & SCALOPPI, E.J. Frequência de distribuição de evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., Florianópolis, ABID, 1988b. v.2, p.1037-52.

SAAD, J.C.C. & SCALOPPI, E.J. Programa multi-alternativo para estimativa da evapotranspiração de referência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 17., Iperó, SBEA, 1988c. v.1, p.115-30.

SILVA, W.L.C. O método combinado para estimar a evapotranspiração e sua sensibilidade e variações no termo aerodinâmico. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., Brasília, 1986. Anais. Brasília, ABID, 1986. v.1, p.185-203.

SPIEGEL, M.R. Cálculo avançado. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1976. 500p.

SPIEGEL, M.R. Estatística. 2.ed. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1985. 453p.

TANNER, C.B. Evaporation of water from plants and soil.
In: KOZLOWSKI, T.T., ed. Water deficits and plant growth. New York, Academic Press, 1968. v.1, p.73-106.

THOM, H.C.S. A frequency distribution for precipitation.
Bulletin of American Meteorological Society, Boston, 32(10): 397, 1951.

THOM, H.C.S. A note on the Gamma distribution. Monthly Weather Review, Boston, 86(4): 117-22, Apr. 1958.

THOM, H.C.S. Direct and inverse tables of the gamma distribution. Washington, Department of Commerce. Environmental Data Service. 1968. 30p.

THOM, H.C.S. Some methods of climatological analysis. Geneva, World Meteorological Organization, s.d. 53p.
(WMO. Technical Note, 81) (WMO, 199.TP, 103).

TOLEDO FILHO, M.R. Probabilidade de suprimento da demanda hídrica ideal da cultura de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) através da precipitação pluvial na zona canavieira do Estado de Alagoas. Piracicaba, 1988. 72p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

TUBELIS, A. & NASCIMENTO, F.J.L. Meteorologia descritiva; fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo, Nobel, 1980. 374p.

VIVALDI, L.J. Utilização da distribuição gama em dados pluviométricos. Piracicaba, 1973. 73p. Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

WEAVER, C.R. & MILLER, M. A precipitation probability computer program. Ohio, Agricultural Research and Development Center, 1967. 10p. (Research Circular, 155).

WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, 108(IR2): 57-74, 1982.

WRIGHT, J.L. & JENSEN, M.E. Peak water requirements in Southern Idaho. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, 98(IR2): 193-201, 1972.

YAO, A.Y.M. The R index for plant water requirement.
Agricultural Meteorology, Amsterdam, 6: 259-73, 1969.

YAO, A.Y.M. A statistical model for the surface relative
humidity. Journal of Applied Meteorology, 13: 17-21,
1974.