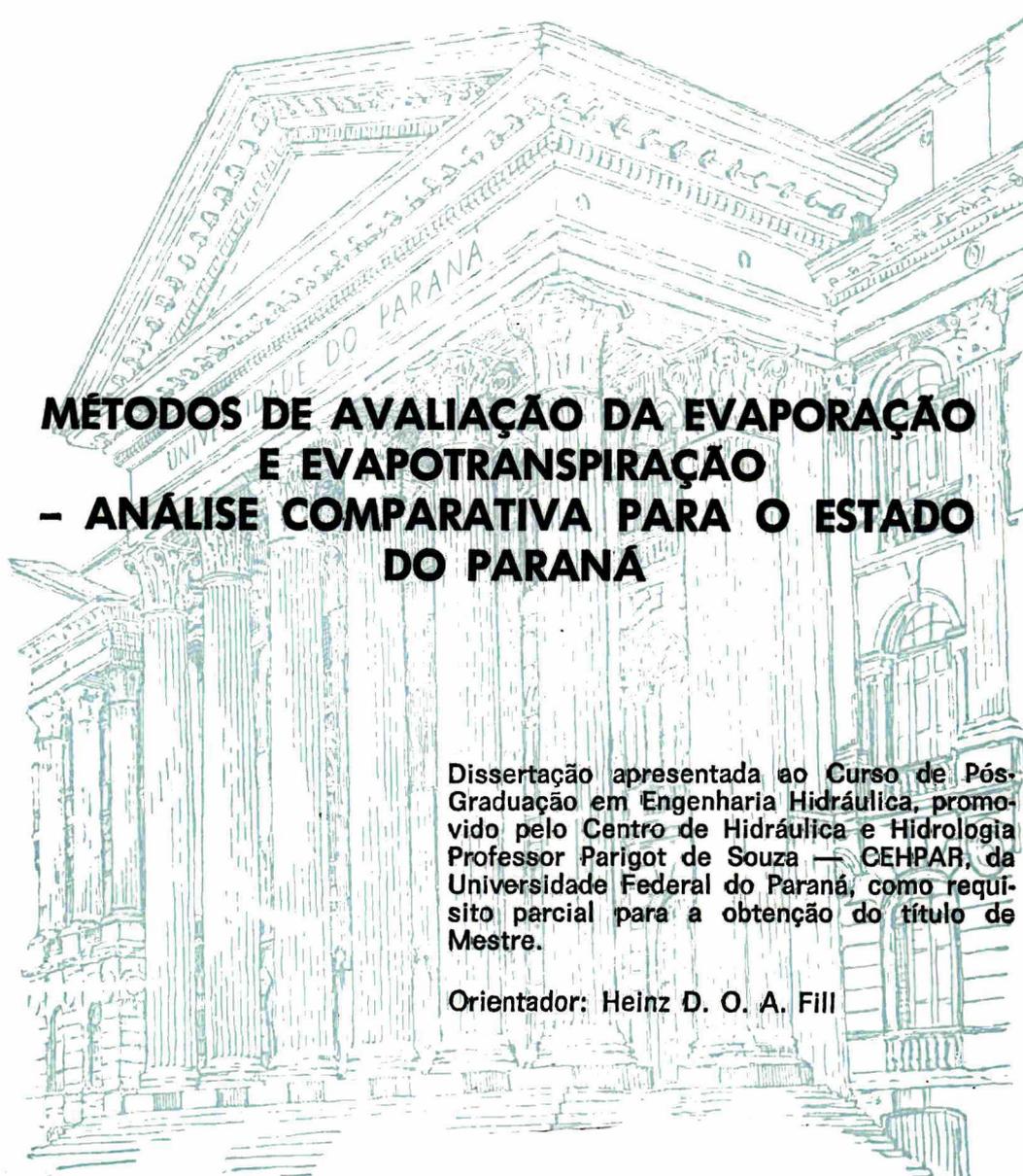


INGRID ILLICH MÜLLER



**MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO  
E EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
- ANÁLISE COMPARATIVA PARA O ESTADO  
DO PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, promovido pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza — CEHPAR, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Heinz D. O. A. Fill

CURITIBA

1995

INGRID ILLICH MÜLLER

**MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO  
E EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
– ANÁLISE COMPARATIVA PARA O ESTADO  
DO PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, promovido pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza — CEHPAR, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Heinz D. O. A. Fill

CURITIBA

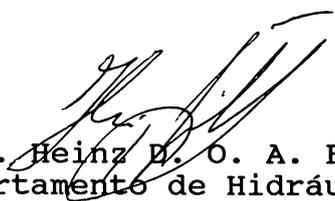
1995

INGRID ILLICH MÜLLER

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
- ANÁLISE COMPARATIVA PARA O ESTADO DO PARANÁ

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

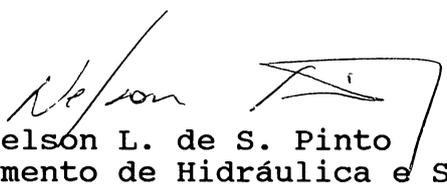
Orientador:



Prof. Heinz D. O. A. Fill  
Departamento de Hidráulica e Saneamento  
Universidade Federal do Paraná



Prof. Carlos Eduardo Morelli Tucci  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Nelson L. de S. Pinto  
Departamento de Hidráulica e Saneamento  
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 19 de dezembro de 1995

a meus pais

Josef e Eva

ao meu marido

Mauricio

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que de uma maneira ou outra contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, em especial:

Aos professores Heinz D. O. A. Fill, Nelson L. de S. Pinto e Eloy Kaviski pela orientação do trabalho.

Às senhoras Maria de Lourdes Machosky e Wally Schick Martins, pelo trabalho de obtenção e organização das referências bibliográficas.

Ao colega Henrique Luiz Scremin pela elaboração dos desenhos.

Ao engenheiro Mauricio Müller pelo auxílio na digitação e revisão do texto.

Ao Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza e à Companhia Paranaense de Energia, pela oportunidade de realização do Curso.

## S U M Á R I O

	<b><u>LISTA DE TABELAS</u></b> .....	ix
	<b><u>LISTA DE FIGURAS</u></b> .....	xii
	<b><u>RESUMO</u></b> .....	xv
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1	GENERALIDADES .....	1
1.2	CONCEITOS BÁSICOS .....	2
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	4
1.4	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO .....	5
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	7
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - COLETÂNEA DE TRABALHOS ANTERIORES</b> .....	9
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO</b> .....	41
3.1	FATORES DETERMINANTES DA EVAPORAÇÃO .....	41
3.1.1	Evaporação de Superfícies Líquidas .....	41
3.1.2	Evaporação de Solos Descobertos .....	45
3.2	AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO .....	46
3.2.1	Avaliação da Evaporação pelo Balanço Hídrico .....	47

3.2.2	Avaliação da Evaporação pelo Método do Balanço de Energia .....	48
3.2.3	Avaliação da Evaporação pelos Métodos da Transferência de Massa .....	52
3.2.4	Avaliação da Evaporação pelos Métodos Combinados .....	55
3.2.5	Avaliação da Evaporação pelo Modelo CRLE ....	59
3.2.6	Avaliação da Evaporação através de Fórm ulas Empíricas .....	60
3.2.7	Medidas Diretas de Evaporação .....	62
3.2.7.1	Medidas Atmosféricas Diretas .....	64
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....</b>	<b>67</b>
4.1	TRANSPIRAÇÃO .....	67
4.1.1	Fatores que Influenciam a Transpiração .....	68
4.1.2	Medida da Transpiração .....	70
4.2	EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	71
4.2.1	Fatores Determinantes da Evapotranspiração Potencial (ETP) .....	72
4.2.2	Fatores Determinantes da Evapotranspiração Real (ETR) .....	73
4.2.3	Avaliação da Evapotranspiração .....	76
4.2.3.1	Avaliação da Evapotranspiração pelo Método Combinado ou Método de Penman .....	76
4.2.3.2	Avaliação da Evapotranspiração pelo Balan ço Hídrico .....	78

4.2.3.3	Avaliação da Evapotranspiração pelo Método do Balanço de Energia .....	80
4.2.3.4	Avaliação da Evapotranspiração pelo Modelo CRAE .....	81
4.2.3.5	Avaliação da Evapotranspiração através de Fórmulas Empíricas .....	85
4.2.3.5.1	Fórmula de Thornthwaite .....	86
4.2.3.5.2	Fórmula de Blaney-Criddle .....	87
4.2.3.5.3	Fórmula de Hargreaves .....	88
4.2.3.6	Avaliação da Evapotranspiração através de Medidas Diretas .....	89
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>92</b>
5.1	APLICAÇÃO DOS MODELOS AO ESTADO DO PARANÁ .....	92
5.2	RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (MODELO CRAE) COMPARADOS AOS RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL .....	99
5.3	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO ..	101
5.4	MEDIDAS DIRETAS DE EVAPORAÇÃO .....	117
5.5	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM TANQUE CLASSE A .....	118
5.6	COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL OBTIDAS PELOS MODELOS CRAE E BALANÇO HÍDRICO .....	120
5.7	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS USANDO OS DADOS NORMAIS PUBLICADOS E DADOS DIÁRIOS .....	126

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>129</b>
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>129</b>
<b>6.2</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>132</b>
	<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>134</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>161</b>

## LISTA DE TABELAS

1.1	EVAPORAÇÃO LÍQUIDA MÉDIA MENSAL (mm) .....	6
2.1	TOTAIS MÉDIOS MENSAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL SEGUNDO PENMAN (mm) .....	10
2.2	NÚMERO DE MESES PARA CADA INTERVALO DA RELAÇÃO PENMAN/THORNTWAITE (X) NO BRASIL (%) .....	10
2.3	EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E POTENCIAL PARA A REGIÃO AMAZÔNICA (mm/ano) .....	11
2.4	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL EM SOURÉ E MONTE ALEGRE - AM (mm) .....	13
2.5	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL PARA O PR (mm) .....	14
2.6	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL EM TAQUARI- RS (mm) ..	16
2.7	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL -RS (mm/ano) .....	17
2.8	DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE EVAPORAÇÃO ESTIMA DA A PARTIR DE EQUAÇÕES E VALORES MEDIDOS EM TANQUES .....	18
2.9	EVAPORAÇÕES MÉDIAS DIÁRIAS MENSAIS E ANUAL (mm) ..	19
2.10	EVAPORAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA EM PIRACICABA (mm) ..	20
2.11	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA (mm) .....	21
2.12	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA (mm) .....	22

2.13	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA DIÁRIA NO AMAZONAS (mm) .....	24
2.14	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA (mm) .....	25
2.15	EVAPORAÇÃO ANUAL EM LAGO RASO (mm) .....	26
2.16	EVAPORAÇÃO MÉDIA MENSAL DO LAGO DE ILHA SOLTEIRA, ANO 1983 (mm) .....	27
2.17	EVAPORAÇÃO MÉDIA MENSAL DO LAGO DE ILHA SOLTEIRA, ANO 1984 (mm) .....	28
2.18	EVAPORAÇÃO DE TANQUE E EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL MÉDIA ANUAL (mm) .....	29
2.19	EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DAS REGIÕES HIDROGRÁ FICAS BRASILEIRAS .....	31
2.20	EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA ANUAL PARA O NORDESTE SEMI-ÁRIDO (mm) .....	32
2.21	EVAPORAÇÃO POTENCIAL E EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL ANUAL EM FOZ DO AREIA - PR (mm) .....	33
2.22	EVAPOTRANSPIRAÇÃO ANUAL (mm) .....	34
2.23	EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PARA O ESTADO DE SÃO PAULO POR BACIA HIDROGRÁFICA (mm/ano) .....	35
2.24	EVAPORAÇÃO POTENCIAL MÉDIA MENSAL (mm) .....	36
2.25	EVAPORAÇÃO ANUAL DE LAGO (mm) .....	39
2.26	VALORES DE EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM PERNAMBUCO (mm) .....	40
3.1	VALORES DO COEFICIENTE K ( $\text{kg/m}^2\text{s Pa}$ ) EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO V (m/s) .....	53

5.1	ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS .....	94
5.2	TOTAIS ANUAIS MÉDIOS DE EVAPORAÇÃO (mm) .....	96
5.3	TOTAIS ANUAIS MÉDIOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO (mm) ..	97
5.3	TOTAIS ANUAIS MÉDIOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO (mm) (cont.) .....	98
5.4	MEDIDAS DIRETAS DE EVAPORAÇÃO E ESTIMATIVAS ATRAVÉS DE MODELOS PARA O PARANÁ (mm/ano) .....	117
5.5	CONSTANTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO MENSAIS PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM TANQUE CLASSE A, VÁLIDAS PARA A CIDADE DE CURITIBA .....	119
5.6	CONSTANTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETER MINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM TANQUE CLASSE A, VÁLIDAS PARA A MÊS DE OUTUBRO PARA O PARANÁ .....	120
5.7	RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PELO BALAN ÇO HÍDRICO E MODELO CRAE .....	121
5.8	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E POTENCIAL (mm/ano) .....	123
5.9	EVAPORAÇÃO MÉDIA ANUAL A PARTIR DE DADOS NOR MAIS E DIÁRIOS PARA O PARANÁ (mm) .....	126
5.10	EVAPOTRANSPIRAÇÃO MÉDIA ANUAL (EVAPOT) A PARTIR DE DADOS NORMAIS E DIÁRIOS PARA O PARANÁ (mm) ....	127
5.11	ESTATÍSTICAS DO TESTE T .....	128
5.12	ESTATÍSTICAS DO TESTE WILCOXON .....	128

## LISTA DE FIGURAS

2.1	EVAPORAÇÃO MÉDIA MENSAL EM TRÊS MARIAS .....	38
2.2	EVAPORAÇÃO MÉDIA MENSAL EM PORTO PARÁ .....	38
3.1	RELAÇÃO ENTRE EVAPORAÇÃO, RADIAÇÃO SOLAR E TEM PERATURA PARA CURITIBA .....	43
3.2	ESQUEMA DO BALANÇO DE ENERGIA .....	50
4.1	RELAÇÕES ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E UMIDADE DO SOLO .....	74
5.1	LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS .....	93
5.2	RELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (EVTP) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (EVTR) .....	100
5.3	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL- TOTAL ANUAL MÉDIO - MODELO DE PENMAN (mm) .....	102
5.4	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL- TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO - MODELO DE PENMAN (mm) ..	103
5.5	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL- TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO - MODELO DE PENMAN (mm) ....	104
5.6	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL- TOTAL ANUAL MÉDIO - MODELO CRAE (mm) .....	105

5.7	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL- TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO - MODELO CRAE (mm) .....	106
5.8	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL- TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO - MODELO CRAE (mm) .....	107
5.9	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL - TOTAL ANUAL MÉDIO - MODELO CRAE (mm) .....	108
5.10	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO - MODELO CRAE (mm) .....	109
5.11	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO - MODELO CRAE (mm) .....	110
5.12	ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO POTENCIAL - TOTAL ANUAL MÉDIO - MODELO DE PENMAN (mm) .....	111
5.13	ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO POTENCIAL - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO - MODELO DE PENMAN (mm) .....	112
5.14	ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO POTENCIAL - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO - MODELO DE PENMAN (mm) .....	113
5.15	ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO DE SUPERFÍCIE LÍQUIDA - TOTAL ANUAL MÉDIO - MODELO CRLE (mm) .....	114
5.16	ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO DE SUPERFÍCIE LÍQUIDA - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO- MODELO CRLE (mm) ..	115
5.17	ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO DE SUPERFÍCIE LÍQUIDA - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO - MODELO CRLE (mm) ...	116
5.18	EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PELO MODELO CRAE EM FUNÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PELO BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO .....	124

5.19	ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL - TOTAL ANUAL MÉDIO DE LONGO PERÍODO - BALANÇO HÍDRICO (mm) .....	125
------	---	-----

## RESUMO

No contexto de avaliação dos fenômenos de evaporação e evapotranspiração existem técnicas teóricas de avaliação, que podem ser empíricas ou semi-empíricas, ou a medição direta destas grandezas. Neste estudo são apresentados e discutidos os conceitos fundamentais dos fenômenos de evaporação e evapotranspiração, e também é feita uma revisão de algumas técnicas mais comumente empregadas em estudos de hidrologia e recursos hídricos. Como produto principal deste trabalho são apresentados os resultados de evaporação potencial e de lago, evapotranspiração real e potencial para o Estado do Paraná. Os resultados são obtidos por diferentes métodos de avaliação usando-se extensos períodos de dados. Por último, os resultados obtidos são analisados e recomenda-se o modelo a ser usado em cada caso.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 GENERALIDADES

A transferência de água para a atmosfera, no estado de vapor, seja pela evaporação de superfícies líquidas, pela evaporação da água do solo, ou pela transpiração vegetal, constitui importante elo do ciclo hidrológico da natureza. Esta mudança de fase da água na forma líquida para vapor ou vice-versa consome ou libera grande quantidade de energia, constituindo-se no maior mecanismo de redistribuição de energia em todo o globo.

Informações quantitativas de evaporação e evapotranspiração são necessárias nos vários campos científicos que tratam dos numerosos problemas do manejo da água. Dados confiáveis de evaporação são exigidos no planejamento, construção e operação de reservatórios e no dimensionamento de sistemas de irrigação e drenagem. Estimativas da evapotranspiração potencial são de grande utilidade para avaliar a quantidade de água necessária para irrigação. A quantificação da evapotranspiração real constitui-se num importante parâmetro da modelagem hidrológica de bacias hidrográficas. O estudo das alterações no balanço hídrico decorrentes da implantação de reservatórios é outro caso onde

estimativas confiáveis de evaporação e evapotranspiração são imprescindíveis. Neste caso ocorre a substituição do fenômeno da evapotranspiração real pela evaporação da superfície líquida do lago.

## 1.2 CONCEITOS BÁSICOS

São apresentadas a seguir algumas definições usadas neste estudo.

i) Evaporação: Genericamente, evaporação é o processo físico pelo qual uma substância passa do estado líquido ao estado gasoso. Em hidrologia, evaporação é o processo físico de transferência da água armazenada sobre a superfície da terra ou nos poros dos solos para a atmosfera.

ii) Evaporação potencial: É a quantidade de água transferida para a atmosfera a partir de uma superfície saturada sujeita às condições atmosféricas reinantes. É também conhecida como poder evaporante.

iii) Evaporação de lago: É a evaporação que ocorre a partir de uma superfície livre de água (espelho de água). É numericamente igual a evaporação potencial no ambiente do lago, mas pode ser significativamente diferente da evaporação potencial em terra.

iv) Evaporação real: É a quantidade de água efetivamente evaporada para as condições atmosféricas e de umidade do solo existentes. Obviamente, a evaporação real não pode exceder a evaporação potencial.

v) Transpiração: É a perda de água para a atmosfera na forma de vapor através dos estômatos e das cutículas das plantas. Embora seja em geral desprezível engloba-se aqui também a transpiração dos animais.

vi) Evapotranspiração: É a perda combinada de água de uma bacia hidrográfica ou de parte dela, para a atmosfera, através dos processos de evaporação das superfícies (solo e água) e da transpiração (plantas e animais).

vii) Evapotranspiração potencial: Representa o total de água transferido para a atmosfera por evaporação e transpiração, de uma superfície extensa, coberta por vegetação e bem suprida de água, não sendo limitado pela disponibilidade de água.

viii) Evapotranspiração real ou efetiva: Representa a perda de água para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições atmosféricas e de umidade do solo existentes.

ix) Evaporação líquida: É a diferença entre a evaporação da superfície do reservatório e a evapotranspiração real na bacia hidrográfica antes da implantação do reservatório.

### 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo principal obter, para o Estado do Paraná, estimativas numéricas de evaporação e evapotranspiração segundo diferentes modelos matemáticos, além de comparar e avaliar os resultados. Para isso, são apresentados os principais e mais usuais métodos de avaliação dessas grandezas.

Além da revisão dos métodos foi feita também uma pesquisa bibliográfica com o intuito de reunir os trabalhos realizados por outros pesquisadores, similares ao que aqui se propõe, e assim tornar disponíveis estes resultados.

Não se pretende neste trabalho esgotar o assunto relativo à quantificação das grandezas evaporação e evapotranspiração, mas sim procurar revisar conceitos e técnicas de avaliação, e fornecer resultados que possam servir em outros estudos, tais como: irrigação, regionalização, abastecimento público, geração de energia, entre outros.

#### 1.4 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A avaliação da evaporação líquida, definida como a diferença entre a evaporação da superfície do reservatório e a evapotranspiração real na bacia hidrográfica antes da implantação do reservatório, é fundamental nos estudos de planejamento da expansão e operação de sistemas hidroelétricos interligados, no que diz respeito à avaliação da disponibilidade da energia garantida e da contribuição energética de cada usina do sistema.

Até recentemente os dados de evaporação constantes no arquivo do Grupo Coordenador de Planejamento dos Sistemas Elétricos - GCPS - para as usinas do Sul do Brasil, eram os resultados da evaporação potencial obtidos na década de sessenta pelo Comitê de Estudos Energéticos da Região Sul do Brasil - Comitê Sul, sob a orientação técnica da CANAMBRA ENGINEERING CONSULTANTS (1968). Estes valores da evaporação líquida mostram uma série de incoerências, tais como: valores médios de evaporação líquida na região Sul superiores ao da região Sudeste, valores médios de evaporação líquida com grande variação ao longo de um mesmo rio e entre bacias vizinhas (ÁVILA et al., 1991).

Um estudo realizado pelo CEHPAR no ano de 1992 (ILLICH, 1992) produziu resultados diferentes dos obtidos pela CANAMBRA e que estão sendo usados em substituição aos anteriores. A tabela 1.1 mostra as evaporações líquidas obtidas pela CANAMBRA e os resultados obtidos pelo CEHPAR para alguns locais.

TABELA 1.1 - EVAPORAÇÃO LÍQUIDA MÉDIA MENSAL (mm)

USINA	RIO	CANAMBRA	CEHPAR
Jacuí	Jacuí	67	24
Garabi <sup>1</sup>	Uruguai	67	29
Campos Novos <sup>1</sup>	Canoas	67	20
Foz do Areia <sup>2</sup>	Iguaçu	67	16
Salto Oshório <sup>2</sup>	Iguaçu	67	23
Cebolão <sup>1</sup>	Tibagi	67	26
Foz do Alonzo <sup>1</sup>	Ivaí	67	24
Salto dos Apertados <sup>1</sup>	Piquiri	67	23
Jurumirim <sup>3</sup>	Paranapanema	31	27
Piraju <sup>3</sup>	Paranapanema	67	27
Xavantês <sup>3</sup>	Paranapanema	47	27
Itaipu <sup>4</sup>	Paraná	67	22
Jupia <sup>4</sup>	Paraná	47	31
Ilha Solteira <sup>4</sup>	Paraná	58	33
Promissão	Tietê	47	32
Marimbondo <sup>5</sup>	Grande	0	35
Água Vermelha <sup>5</sup>	Grande	35	35
Emborcação	Paranaíba	58	36
Três Marias	São Francisco	80	35
Jequitinhonha <sup>1</sup>	Jequitinhonha	95	37
Mascarenhas	Doce	95	22

(1) Usina hidrelétrica em estudo

(2) a (5) Usinas hidrelétricas situadas no mesmo rio

FONTE: ÁVILA et al., 1991 e ILLICH, 1992

Analisando a tabela 1.1 constata-se que os resultados são bastante conflitantes, justificando a realização de um estudo mais detalhado de revisão de metodologias de cálculo da evaporação e evapotranspiração, e assim dispor de estimativas mais precisas da evaporação líquida. Embora o presente trabalho se limita ao Estado do Paraná, dispor de estimativas mais precisas da evaporação líquida será de grande utilidade não apenas nos estudos envolvendo o problema do suprimento de energia, mas também em estudos de abastecimento de água, irrigação, planejamento e gestão de bacias hidrográficas. Ademais, uma vez desenvolvida uma metodologia adequada para estimar a evaporação líquida, a sua aplicação em outras regiões do Brasil seria relativamente simples.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, incluindo-se esta introdução.

O capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica com o objetivo de reunir os trabalhos que apresentam resultados de evaporação e evapotranspiração em qualquer região do Brasil. Poucas foram as pesquisas encontradas que apresentam resultados para grandes regiões. A maioria dos trabalhos apresenta valores numéricos para locais isolados e sem relação com resultados obtidos por outros pesquisadores.

O capítulo 3 descreve o fenômeno da evaporação. São apresentados os conceitos, os fatores intervenientes e as diferentes formas de avaliação, através dos métodos empíricos e abordagens teóricas.

De forma similar ao capítulo 3, o capítulo 4 descreve os fenômenos da transpiração e evapotranspiração.

No capítulo 5 são mostrados os resultados numéricos obtidos de evaporação e evapotranspiração, para o Estado do Paraná, usando uma rede extensa de estações meteorológicas e séries históricas de dados bastante longas.

Finalmente no capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões obtidas, as recomendações e sugestões para a realização de trabalhos futuros dentro desta linha de pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - COLETÂNEA DE TRABALHOS ANTERIORES

O objetivo deste capítulo é reunir os trabalhos já realizados, que apresentam resultados de evaporação e/ou evapotranspiração potencial e real, para locais ou regiões no Brasil. Não se pretende resumir trabalhos, mas sim mostrar resultados das grandezas em estudo. Para cada trabalho, além dos resultados, são descritos de maneira sucinta o período de dados utilizados, o local para o qual o estudo foi realizado, e as conclusões obtidas no estudo. Os trabalhos estão apresentados em ordem cronológica.

MOTA, OLIVEIRA e BEIRSDORF (1978) obtiveram, para as cinco regiões brasileiras, valores de evapotranspiração potencial segundo Penman. Estes valores foram comparados aos obtidos pela fórmula de Thornthwaite.

Foram usados os dados de temperatura média, umidade relativa e insolação de 95 estações brasileiras, publicados pelo extinto Escritório de Meteorologia do Ministério da Agricultura para o período 1931 a 1960 (BRASIL, 1969). Os dados de velocidade do vento foram coletados junto ao Instituto Nacional de Meteorologia.

Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 2.1. A tabela 2.2 mostra os valores da relação Penman/Thornthwaite (X) nas regiões brasileiras.

TABELA 2.1 - TOTAIS MÉDIOS MENSAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL SEGUNDO PENMAN (mm)

MESES	REGIÃO GEOGRÁFICA				
	SUL	SUDESTE	CENTRO-OESTE	NORDESTE	NORTE
Jan	152	127	130	163	113
Fev	123	112	114	142	100
Mar	108	109	118	140	107
Abr	75	90	105	122	101
Mai	51	80	106	112	104
Jun	38	69	98	104	105
Jul	43	76	111	114	117
Ago	61	96	139	134	135
Set	79	103	145	150	139
Out	106	114	142	167	143
Nov	134	113	131	162	130
Dez	155	120	132	165	124

FONTE: MOTA, OLIVEIRA e BEIRSDORF, 1978

TABELA 2.2 - NÚMERO DE MESES PARA CADA INTERVALO DA RELAÇÃO PENMAN/THORNTHWAITTE (X) NO BRASIL (%)

X	REGIÃO				
	SUL	SUDESTE	CENTRO-OESTE	NORDESTE	NORTE
$X \leq 1,0$	15	16	21	15	75
$1,0 < X \leq 1,4$	52	56	55	70	25
$1,4 < X \leq 1,8$	26	22	16	14	-
$X > 1,8$	7	6	8	1	-

FONTE: MOTA, OLIVEIRA e BEIRSDORF, 1978

As conclusões do trabalho podem ser assim resumidas: i) predominância de valores maiores de evapotranspiração potencial por Penman entre os meses de agosto a março; e, ii) a relação entre as evapotranspirações de Penman e Thornthwaite se mantêm entre 1 e 1,4 para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste. Apenas para a região Norte a relação é menor que 1,0, o que caracteriza a existência de estações úmidas.

MARQUES, SALATI e SANTOS (1979) obtiveram valores de evapotranspiração real para a região Amazônica segundo o método aerológico, que se fundamenta no cálculo da divergência do campo de transporte do vapor de água na troposfera sobre a região. Os valores obtidos foram comparados com resultados de evapotranspiração publicados por outros autores segundo outros métodos, como mostrado na tabela 2.3.

TABELA 2.3 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E POTENCIAL  
PARA A REGIÃO AMAZÔNICA (mm/ano)

PESQUISADOR	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	
	REAL	POTENCIAL
Marques	1260 (1)	1330 (3)
Marques	1000 (2)	1330 (3)
Vila Nova (4)	1168	1460
Molion (5)	1146	
Ribeiro (6)	1229	1536
Budyko (7)	800	1000
IPEAN (8)	1320	1475
DMET (9)	1306	1452

- (1) Método aerológico; média do período 1972/1975.  
 (2) Método aerológico; ano 1972, trecho Belém-Manaus.  
 (3) Método de Thornthwaite; ano 1972, trecho Belém-Manaus.  
 (4) Método de Penman adaptado para florestas; período 1931/1960 na maioria das estações; estimou-se a evaporação real como sendo 80% da potencial.  
 (5) Método climatonômico; período 1931/1960.  
 (6) Método de Thornthwaite; período 1965/1973; Reserva Florestal Ducke, próxima à Manaus.  
 (7) Considerando a evapotranspiração real como sendo 80% da potencial.  
 (8) Método de Thornthwaite; período acima de 10 anos; médias de 7 estações (IPEAN = Instituto de Pesquisas Agropecuárias do Norte).  
 (9) Método de Thornthwaite; períodos diversos. Média para as 7 estações usadas em (8). (DMET = Departamento Nacional de Meteorologia).

Segundo Marques, Salati e Santos, os resultados da tabela 2.3, mostram que a evapotranspiração real para a região Amazônica, é da ordem de 1200 mm por ano, o que corresponde a aproximadamente 50% do total anual precipitado na região.

O trabalho de SANTOS (1979) também apresenta resultados da evapotranspiração potencial para a bacia Amazônica. Para a determinação da evapotranspiração potencial foram utilizadas várias fórmulas empíricas (Hargreaves, Thornthwaite, Meyer, Kusmin e Blaney-Criddle) e o método de Penman (SANTOS, 1979). Os resultados obtidos foram comparados com as observações de tanque classe A e do evaporímetro Piché. Foram usadas cinco estações climatológicas do Estado do Pará com um e dois anos de dados. Os resultados obtidos nas estações climatológicas de Souré e Monte Alegre estão mostrados na tabela 2.4.

Segundo Santos, os valores mensais obtidos apresentam grandes dispersões que tornam difícil a escolha da fórmula mais adequada para cálculo da evapotranspiração na região.

**TABELA 2.4 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL EM SOURÉ  
E MONTE ALEGRE - AM (mm)**

LOCAL/ANO	MÊS	HARGR	THORN	PENMAN	MEYER	KUSMIN	BLANEY	TANQUE	PICHÉ
S O U R É	Jan	80	132	100	55	30	93	85	58
	Fev	78	126	88	60	31	66	36	45
	Mar	83	128	96	61	34	76	42	47
	Abr	87	140	102	73	39	102	62	55
	Mai	95	145	114	83	47	129	79	61
	Jun	97	145	117	94	51	152	126	74
	Jul	103	145	129	99	56	184	152	85
	Ago	115	155	135	130	76	193	153	100
	Set	117	165	135	149	85	198	186	112
	Out	121	174	138	137	76	196	208	125
	Nov	121	177	135	157	87	190	206	128
	Dez	126	182	140	159	91	185	202	128
	<b>Total</b>	<b>1223</b>	<b>1813</b>	<b>1430</b>	<b>1257</b>	<b>703</b>	<b>1764</b>	<b>1537</b>	<b>1018</b>
S O U R É	Jan	94	142	103	75	40	88	77	72
	Fev	83	130	89	75	38	73	74	45
	Mar	81	132	91	57	31	57	44	48
	Abr	78	138	88	54	28	53	28	37
	Mai	84	142	107	59	32	116	85	48
	Jun	96	146	120	89	48	168	118	67
	Jul	108	146	128	120	72	164	128	80
	Ago	141	153	145	223	139	186	157	94
	Set	125	167	141	194	120	188	199	111
	Out	137	179	149	221	142	186	200	128
	Nov	136	179	147	238	150	188	208	130
	Dez	126	182	140	159	91	185	200	128
	<b>Total</b>	<b>1287</b>	<b>1837</b>	<b>1448</b>	<b>1564</b>	<b>932</b>	<b>1652</b>	<b>1518</b>	<b>988</b>
M. A L E G R E	Jan	96	106	107	92	57	109	152	79
	Fev	80	103	91	67	37	85	100	58
	Mar	86	109	97	68	41	78	150	57
	Abr	89	114	104	81	48	114	133	64
	Mai	101	127	117	104	64	134	167	78
	Jun	94	117	110	94	56	130	100	68
	Jul	112	127	132	134	85	180	143	99
	Ago	131	140	145	196	129	189	216	133
	Set	139	154	147	244	156	188	242	158
	Out	151	166	155	272	179	178	234	147
	Nov	142	158	139	252	159	141	223	146
	Dez	153	170	153	280	184	164	267	178
	<b>Total</b>	<b>1374</b>	<b>1589</b>	<b>1496</b>	<b>1884</b>	<b>1197</b>	<b>1690</b>	<b>2127</b>	<b>1265</b>
M. A L E G R E	Jan	123	127	135	165	106	174	152	104
	Fev	99	111	97	123	69	80	100	56
	Mar	102	118	107	107	68	89	150	70
	Abr	88	106	91	82	50	58	133	48
	Mai	103	125	119	112	71	136	135	72
	Jun	102	121	113	115	71	125	100	72
	Jul	110	130	130	134	87	167	182	104
	Ago	133	151	149	207	137	194	241	146
	Set	136	162	147	238	154	183	238	160
	Out	142	164	151	243	163	173	265	161
	Nov	154	166	154	317	209	163	271	178
	Dez	122	143	122	167	109	104	184	124
	<b>Total</b>	<b>1415</b>	<b>1624</b>	<b>1514</b>	<b>2009</b>	<b>1292</b>	<b>1648</b>	<b>2151</b>	<b>1295</b>

O trabalho de OLIVEIRA, MOTA e SILVA (1980) apresenta uma metodologia para estimar a evapotranspiração potencial a partir de equações de regressão, função da altitude, latitude e distância mínima ao Oceano Atlântico. As evapotranspirações potenciais foram calculadas pelo método de Penman para 96 estações meteorológicas com dados do período 1931-1960. As equações de regressão foram obtidas para as regiões Sul, Sudeste-Centro-Oeste, Nordeste e Norte. São 13 equações para cada região, sendo uma para cada mês do ano e uma anual. As equações válidas para o Estado do Paraná, função da altitude (alt) em metros, latitude (lat) em minutos, distância mínima ao oceano Atlântico (dist) em quilômetros, estão mostradas na tabela 2.5.

TABELA 2.5 - EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL PARA O PR (mm)

PERÍODO	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO
Jan	$-142,2657 + 0,1643 \text{ lat} + 0,0590 \text{ dist}$
Fev	$-94,7953 + 0,1206 \text{ lat} + 0,0495 \text{ dist}$
Mar	$12,4742 + 0,0521 \text{ lat} + 0,0280 \text{ dist}$
Abr	$72,1405 + 0,0103 \text{ dist}$
Mai	$75,1953 - 0,0141 \text{ lat}$
Jun	$61,0416 - 0,0137 \text{ lat}$
Jul	$72,2312 - 0,0171 \text{ lat}$
Ago	$55,5784 - 0,0220 \text{ dist}$
Set	$74,3914 + 0,0196 \text{ dist}$
Out	$32,2086 + 0,0387 \text{ lat} + 0,0321 \text{ dist}$
Nov	$-72,7987 + 0,1147 \text{ lat} + 0,0471 \text{ dist}$
Dez	$-124,0923 + 0,1554 \text{ lat} + 0,0582 \text{ dist}$
Anual	$72,8317 + 0,5637 \text{ lat} + 0,3515 \text{ dist}$

FONTE: OLIVEIRA, MOTA e SILVA, 1980

Com base nas equações obtidas, os autores concluem que para o Sul, a altitude não é importante, sendo a latitude o elemento mais importante.

DORFMAN (1980) testou diversos métodos de avaliação da evapotranspiração potencial usando como padrão o tanque classe A. Foi definida uma função linear entre cada modelo estudado e as medidas no tanque classe A, sendo que a evaporação do tanque foi considerada equivalente à evapotranspiração potencial de um lisímetro e os modelos adotados foram: Thornthwaite, Blaney-Criddle, Ivanov, Papadakis, Turc, Makkink e Penman. Foram introduzidas modificações na fórmula de Makkink e Penman, resultando os modelos Raglo I, Makkink modificado, Penman/Embrapa, Penman/Ilri e Penman/Linacre.

O estudo foi realizado para a estação agrometeorológica de Taquari no Rio Grande do Sul, com dados do período de 1975 a 1976. Os resultados obtidos por Dorfman para a evapotranspiração potencial, estão mostrados na tabela 2.6.

Pode-se ver que os resultados obtidos por Dorfman variaram bastante, sendo que os modelos de Makkink e Raglo I apresentaram os maiores desvios em relação a evaporação do tanque classe A. Dorfman comparou estes resultados com os obtidos por outros pesquisadores, conforme mostrado na tabela 2.7.

As conclusões obtidas por Dorfman, podem ser assim resumidas: i) os métodos baseados na temperatura (Thornthwaite e Blaney-Criddle) e os métodos combinados, baseados na fórmula de Penman, afastam-se mais dos valores da evaporação do tanque no outono e inverno; ii) já os métodos baseados na umidade (Ivanov e Papadakis) e na radiação (Raglo, Makkink e Turc) apresentam os maiores desvios em relação aos valores da evaporação do tanque no inverno e primavera.

TABELA 2.6 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL EM TAQUARI - RS (mm)

LOCAL/ANO	FÓRMULA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
T	Tanque	215	174	143	93	67	52	64	62	101	134	185	214	1505
	Thornthwaite	141	124	111	71	51	34	29	44	57	77	105	143	988
A	Blaney-Cridde	192	167	159	117	95	75	71	90	105	130	158	195	1555
Q	Ivanov	128	104	85	75	63	48	61	52	62	97	141	147	1064
U	Papadakis	108	101	82	72	61	49	50	42	52	72	102	117	906
A	Makkink	107	87	73	58	44	36	38	35	54	74	104	117	825
R	Turc Diário	129	106	93	75	60	49	49	49	69	92	125	140	1035
I	Turc Mensal	128	108	92	77	60	51	51	48	71	91	125	139	1041
	Raglo I	246	200	173	147	119	104	114	96	141	186	247	269	2042
1975	Makkink Modificado	181	147	126	101	78	65	69	63	94	127	176	198	1424
T	Tanque	196	207	127	105	67	62	63	76	102	159	196	223	1580
	Thornthwaite	152	123	98	65	48	29	34	39	54	81	102	143	967
	Blaney-Cridde	201	166	147	110	91	68	75	83	101	132	154	194	1521
	Ivanov	119	139	86	78	50	58	49	60	78	101	117	145	1079
T	Papadakis	108	113	76	72	49	48	45	50	63	76	91	113	903
A	Makkink	107	103	70	61	411	37	37	48	60	89	97	112	861
Q	Turc Diário	130	124	89	78	56	48	49	61	75	107	116	134	1067
U	Turc Mensal	129	121	89	80	55	50	50	61	77	107	119	133	1072
A	Penman/EMBRAPA*/@=0,20	136	119	80	61	37	26	26	41	64	99	115	132	935
R	Penman/Itri/@=0,20	141	128	84	67	40	31	31	46	68	106	122	140	1004
I	Penman/Linacre/@=0,20	132	121	78	62	35	29	28	44	66	103	119	134	950
	Penman/EMBRAPA*/@=0,05	163	145	99	77	47	35	36	54	79	121	139	160	1155
	Penman/Itri/@=0,05	168	153	103	83	51	41	41	59	84	129	146	158	1225
	Penman/Linacre/@=0,05	159	146	96	78	46	39	37	57	82	126	143	162	1171
	Raglo I	245	236	171	157	111	108	108	135	158	222	233	258	2142
1976	Makkink Modificado	182	174	122	107	73	66	67	85	104	151	164	189	1483

(\*) - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA

FONTE DORFMAN, 1980

TABELA 2.7 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL - RS (mm/ano)

PESQUISADOR ENTIDADE	MÉTODO	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL
EMBRAPA *	Penman	971 (1)
		962 (2)
INCRA **	Penman/Bavel Thornthwaite	859 (3)
		945 (3)
DORFMAN	Penman/EMBRAPA/ $\alpha=0,2$ (1976) Thornthwaite (1975) Thornthwaite (1976)	935 (3)
		988 (3)
		967 (3)

(1) -Micro Região 308 - Alvorada, Porto Alegre, Viamão e municípios adjacentes.

(2) -Micro Região 322 - Cruz Alta, Júlio de Mesquita, Santiago e municípios adjacentes.

(3) -Taquari.

(\*) -Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

(\*\*)-Instituto Nacional da Colonização e Reforma Agrária.

FONTE: DORFMAN, 1980

SILVA et al. (1980) estabeleceram relações entre os valores de evaporação medida em tanque classe A e em tanques classe A modificados com os valores obtidos pelos modelos de Penman, Bowen e McIlroy.

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos na estação climatológica principal do Instituto Nacional de Meteorologia da Universidade Federal de Viçosa em Minas Gerais, no período de 05 março a 30 de junho de 1979.

A evaporação acumulada medida no tanque classe A padrão para o período de 118 dias foi de 348,36 mm, contra 303,94 mm no tanque coberto, 307,37 mm no tanque cercado, e 265,85 mm no tanque enterrado.

As diferenças em termos percentuais entre os valores de evaporação estimados pelas equações de Penman, Bowen e McIlroy

e valores medidos nos tanques classe A padrão e modificado estão indicados na tabela 2.8.

TABELA 2.8 - DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE EVAPORAÇÃO ESTIMADA A PARTIR DE EQUAÇÕES E VALORES MEDIDOS EM TANQUES

MÉTODOS	TANQUES CLASSE A			
	PADRÃO	COBERTO	CERCADO	ENTERRADO
Penman	+ 4,7	+ 20,1	+ 18,7	+ 37,3
Bowen	- 0,8	+ 13,7	+ 12,4	+ 30,0
McIlroy	- 9,0	+ 4,3	+ 3,2	+ 19,3

FONTE: SILVA et al, 1980

As conclusões obtidas no trabalho, podem ser assim resumidas: i) o uso de tela nos tanques como cobertura ou cerca, diminui a evaporação em relação ao tanque padrão, porque a tela diminuiu a radiação solar e a velocidade do vento na superfície da água desses tanques; e ii) a evaporação medida nos tanques enterrados é menor que a evaporação medida no tanque classe A, devido a menor velocidade do vento na superfície da água e a ausência de fluxo de radiação solar através das paredes do tanque enterrado.

Trabalho na mesma linha comparativa de resultados de evaporação potencial em tanques e pela fórmula de Penman foi realizado por MATEUS e DUARTE (1981). Os dados foram obtidos na estação climatológica instalada e operada pela HIDROESB - Laboratório Saturnino de Brito S.A, situada numa bacia representativa da Amazônia no período de julho de 1980 a junho de 1981. Os resultados obtidos estão indicados na tabela 2.9.

TABELA 2.9 - EVAPORAÇÕES MÉDIAS DIÁRIAS MENSALIS E ANUAL (mm)

MESES	TANQUE CLASSE A	TANQUE DE 20 m <sup>2</sup>	FÓRMULA DE PENMAN
Jul/80	3,24	2,73	4,23
Ago	3,84	3,20	4,83
Set	4,29	3,44	5,24
Out	3,93	3,28	4,97
Nov	2,92	2,73	4,26
Dez	3,36	2,84	4,28
Jan/81	2,79	2,21	4,04
Fev	3,00	2,31	4,36
Mar	3,97	3,00	4,72
Abr	3,46	2,66	4,45
Mai	3,04	2,60	4,06
Jun	3,33	2,70	4,24
Ano	3,43	2,81	4,47

FONTE: MATEUS e DUARTE, 1981

Segundo Mateus e Duarte os valores de evaporação obtidos pelos tanques classe A e de 20 m<sup>2</sup>, são sempre inferiores aos calculados pela fórmula de Penman, apesar da correlação alta entre os dados diários e mensais.

O trabalho de VILLA NOVA e OMETTO (1981) apresenta resultados de evaporação e evapotranspiração potencial segundo um método simplificado, segundo Penman, e, valores medidos em tanques classe A e em evaporímetros Piché.

O método proposto pelos autores, denominado de EPR, consiste basicamente de uma simplificação do termo de energia do modelo de Penman, através de um estudo de correlação entre o balanço de energia diário, a constante solar e a razão de insolação. O termo aerodinâmico do modelo EPR é estimado através da evaporação medida no Piché, eliminando assim o parâmetro velocidade do vento, que é uma medida pouco usual.

A tabela 2.10 mostra os resultados de evaporação potencial para a cidade de Piracicaba, Estado de São Paulo, usando dados do período de junho de 1968 a junho de 1969, segundo o método proposto (EPR), pelo método original de Penman (EPE), e os valores medidos no tanque de 20 m<sup>2</sup> (E20) e no evaporímetro Piché (EPI).

TABELA 2.10 - EVAPORAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA EM PIRACICABA (mm)

MESES	EPR	EPE	E20	EPI
Janeiro	5,8	6,0	5,2	4,5
Fevereiro	4,9	5,1	5,0	4,2
Março	5,0	5,1	4,7	4,3
Abril	3,3	3,7	3,9	3,8
Mai	2,8	2,6	3,0	3,8
Junho	2,6	2,3	2,8	3,9
Julho	2,7	2,3	2,3	3,5
Agosto	3,0	3,0	3,0	4,8
Setembro	3,8	4,2	3,6	5,2
Outubro	5,2	5,1	4,6	4,6
Novembro	5,8	5,8	6,1	4,5
Dezembro	5,6	5,9	5,2	3,8

FONTE: VILLA NOVA e OMETTO, 1981

A tabela 2.11 apresenta resultados de evapotranspiração potencial para as cidades de Ribeirão Preto e Pindamonhangaba, Estado de São Paulo, usando dados do período de 1956 a 1959, segundo o método proposto por Villa Nova e Ometto (ETPR), por Penman (ETPE), e valores medidos em evapotranspirômetros do tipo Thornthwaite modificado (ETME). O método proposto ETPR para determinação da evapotranspiração potencial, é semelhante ao método EPR para evaporação potencial com as mesmas simplificações nos termos de energia e aerodinâmico.

TABELA 2.11 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA (mm)

MESES	RIBEIRÃO PRETO			PINDAMONHANGABA		
	ETPR	ETPE	ETME	ETPR	ETPE	ETME
Janeiro	4,2	5,0	4,2	4,4	5,2	4,4
Fevereiro	4,2	5,0	4,6	4,1	4,5	4,1
Março	3,8	4,4	3,6	3,6	3,6	3,6
Abril	2,7	3,7	2,9	2,4	3,1	2,7
Mai	2,3	2,9	2,3	1,8	2,1	2,0
Junho	2,2	2,5	1,6	1,7	1,8	1,6
Julho	2,4	2,9	2,0	2,0	2,1	2,1
Agosto	3,0	3,9	2,5	2,4	2,7	2,3
Setembro	3,5	4,8	3,2	2,9	3,5	2,9
Outubro	4,4	5,2	4,1	3,6	3,8	3,8
Novembro	4,6	5,6	4,2	4,0	4,9	3,8
Dezembro	4,5	5,1	4,2	4,0	4,6	4,2

FONTE: VILLA NOVA E OMETTO, 1981

Segundo Villa Nova e Ometto, os valores medidos de evaporação apresentaram boa concordância com Penman e com o método proposto. Já para a evapotranspiração potencial os valores medidos apresentaram melhor concordância com os valores obtidos segundo o método proposto do que aqueles obtidos pelo método original de Penman.

O trabalho de BELTRAME et al. (1981) procura estabelecer para o Rio Grande do Sul o melhor modelo para a estimativa da evapotranspiração potencial pelo método de Penman, usando medidas diretas e estimativas da radiação líquida. Os dados da radiação líquida medida foram obtidos no período de setembro de 1979 a maio de 1980.

Foram definidas duas expressões para o cálculo da evapotranspiração potencial, ambas derivadas da fórmula de Penman, uma utilizando valores estimados de radiação (modelo I)

e outra usando valores medidos de radiação (modelo II). Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 2.12.

TABELA 2.12 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA (mm)

PERÍODO	MODELO I	MODELO II
03/Set/79	3,03	2,51
04/Set/79	1,85	2,23
05/Set/79	3,14	2,45
06/Set/79	3,66	2,65
07/Set/79	3,90	2,64
08/Set/79	4,04	4,03
09/Set/79	3,51	3,78
10/Set/79	1,35	2,61
11/Set/79	3,15	3,01
12/Set/79	3,65	3,42
04/Out/79	1,54	3,08
05/Out/79	1,11	2,38
06/Out/79	1,17	2,38
07/Out/79	1,63	2,60
08/Out/79	3,45	3,68
09/Out/79	4,54	4,04
10/Out/79	4,42	4,21
11/Out/79	5,12	5,06
12/Out/79	4,12	4,62
13/Out/79	2,23	2,45
08/Jan/80	4,70	3,38
09/Jan/80	5,93	2,57
10/Jan/80	4,04	5,33
11/Jan/80	6,66	5,43
12/Jan/80	6,32	4,43
13/Jan/80	6,49	6,54
14/Jan/80	5,44	6,51
15/Jan/80	5,69	6,35
16/Jan/80	4,13	5,85
17/Jan/80	6,51	6,14
19/Mai/80	2,04	1,73
20/Mai/80	2,32	1,68
21/Mai/80	1,18	1,79
22/Mai/80	0,72	1,61
23/Mai/80	2,20	1,62
24/Mai/80	2,36	1,71
25/Mai/80	1,78	1,48
26/Mai/80	2,28	1,48
27/Mai/80	2,45	1,73
28/Mai/80	2,45	1,70

FONTE: BELTRAME et al, 1981

Com base nos critérios estatísticos aplicados aos resultados (comparação de variâncias residuais, significância global dos modelos ao nível de 5%, e erros padrões da estimativa dos coeficientes angulares das regressões), os autores notaram uma acentuada diferença nos valores de evapotranspiração potencial estimada pelos modelos. Este comportamento reflete a tendência de que estimativas de evapotranspiração potencial obtidas a partir de estimativas de radiação líquida não são muito precisas para períodos de 1 dia. Apesar dos resultados diferentes, os autores concluem o trabalho apontando o modelo II como o melhor para efetuar estimativas da evapotranspiração potencial diária para o Rio Grande do Sul.

O trabalho de MARQUES FILHO, RIBEIRO e SALATI (1983) mostra estimativas de evapotranspiração potencial para a região de florestas da Amazônia, obtidas pela equação de Thom e Olivier. Os dados utilizados correspondem a 19 estações climatológicas com períodos de observações variáveis de 5 a 30 anos. Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 2.13.

TABELA 2.13 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MÉDIA DIÁRIA NO AMAZONAS (mm)

LOCAL	EVAPOT. POT
Macapá - AP	9,1
Uaupés - AM	5,7
Pari Cachoeira - AM	5,8
Yauareté - AM	5,8
Santa Isabel - AM	6,3
Barcelos - AM	7,3
Santarém - PA	8,2
Fonte Boa - AM	6,3
Parintins - AM	8,4
Manaus - AM	9,2
Altamira - PA	7,1
Tefé - AM	8,8
Coari - AM	6,0
Benjamin Constant - AM	6,0
Carauari - AM	5,9
Alto Tapajós - PA	6,0
Humaitá - AM	7,7
Porto Velho - RO	7,4
Rio Branco - AC	6,4

FONTE: MARQUES FILHO, RIBEIRO e SALATI, 1983

Como conclusão do trabalho, os autores definem como valor médio para a evapotranspiração potencial, na região Amazônica, o valor de 7 mm/dia.

BELTRAME e FIETZ (1986) apresentaram valores de evapotranspiração potencial a partir da expressão de Penman usando radiação líquida medida e radiações líquidas geradas segundo 3 modelos de regressão linear. Os dados usados foram coletados em estações localizadas em Porto Alegre e Cachoeirinha no Rio Grande do Sul.

Os modelos de geração das radiações líquidas utilizam as seguintes variáveis explicativas: a radiação solar no modelo I; o balanço de energia entre radiação solar efetiva e irradiação

terrestre, para o modelo II; e, a razão entre o número de horas de sol ocorridas e o número de horas de sol possíveis para o modelo III.

Com as radiações líquidas geradas pelos modelos e a radiação medida, estimou-se a evapotranspiração potencial diária pela fórmula de Penman. Os resultados obtidos estão indicados na tabela 2.14.

TABELA 2.14 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA (mm)

RADIÇÃO			
MEDIDA	MODELO I	MODELO II	MODELO III
6,17	6,02	5,86	5,18
6,52	6,69	6,14	6,07
6,01	6,30	5,64	5,46
6,22	6,23	5,71	5,39
6,44	6,57	6,15	5,39
2,75	2,52	2,59	3,28
3,59	3,52	4,95	3,64
3,56	3,53	4,72	3,83
3,57	3,53	4,26	4,09
3,59	3,22	4,21	3,86
1,19	1,19	1,05	1,48
1,91	1,96	1,13	2,85
1,50	1,48	0,50	2,41
1,79	2,02	1,16	2,39
1,72	1,97	0,75	2,63
4,11	4,24	4,33	4,30
4,50	4,55	2,87	2,26
4,38	4,25	2,31	2,99
5,16	5,12	3,04	4,15
4,26	4,44	1,72	3,29

FONTE: BELTRAME e FIETZ, 1986

Para Beltrame e Fietz, os valores de evapotranspiração estimados, usando a radiação líquida medida e a obtida pelo modelo I, são muito próximos, e as evapotranspirações obtidas a partir dos modelos II e III apresentam grande variabilidade, tornando o uso destes modelos impróprio para a região.

DIAS (1986), DIAS e KELMAN (1987) e DIAS, KELMAN e DAMÁZIO (s.d), compararam as estimativas de evaporação em lagos obtidas em tanques classe A com as estimativas obtidas pelo modelo CRLE ("Complementary Relationship Lake Evaporation") para o reservatório de Sobradinho. Os dados usados são de 3 postos localizados ao redor do reservatório nos anos de 1979 a 1982. Os resultados estão mostrados na tabela 2.15.

TABELA 2.15 - EVAPORAÇÃO ANUAL EM LAGO RASO (mm)

ANO	REMANSO (BA)		BARRA (BA)		PETROLINA (PE)	
	CRLE	MEDIDA *	CRLE	MEDIDA *	CRLE	MEDIDA *
1979	1913	2187	1863	1322	1905	-
1980	1874	2288	1866	1469	1972	-
1981	2011	2247	1981	1386	1938	-
1982	2038	2382	2049	1940	1903	-

\* Evaporação medida = 0,7 \* evaporação em tanque em classe A.

FONTE: DIAS, 1986

Segundo os autores, os resultados obtidos pelo modelo CRLE são uniformes e parecidos nos 3 postos em que foi aplicado, o mesmo não se verifica nos resultados obtidos a partir dos dados dos tanques que variaram bastante, provavelmente devido a grande variação regional do coeficiente de tanque e da localização dos tanques em relação ao reservatório.

O trabalho de TROVATI (1987) compara as estimativas da evaporação de lago obtidas usando o modelo CRWE ("Complementary Relationship Wet-surface Evaporation") e CRLE ("Complementary Relationship Lake Evaporation") com os resultados obtidos no tanque classe A para a usina hidrelétrica de Ilha Solteira, divisa dos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Os dados para realização do estudo são da estação meteorológica Ilha Solteira, período de 1983 a 1984.

Os resultados obtidos por Trovati estão apresentados nas tabelas 2.16 e 2.17. Os valores representam as médias mensais de evaporação de uma superfície líquida de dimensão de um tanque (EWT) e da dimensão de um lago (EWL) estimadas pelo modelo CRWE, e a evaporação potencial (EP) e a evaporação de lago (EL) estimados pelo modelo CRLE. Também estão indicados os valores mensais da evaporação de tanque classe A (ECA) da estação meteorológica Ilha Solteira.

TABELA 2.16 - EVAPORAÇÃO MÉDIA MENSAL DO LAGO DE ILHA SOLTEIRA, ANO 1983 (mm)

MÊS	EWT	EWL	EP	EL	ECA
Jan	172	144	189	184	159
Fev	169	154	168	153	172
Mar	183	163	176	154	195
Abr	144	131	159	148	158
Mai	124	99	168	149	135
Jun	96	73	132	115	100
Jul	151	96	152	96	167
Ago	176	119	146	84	186
Set	136	111	135	109	146
Out	175	155	149	125	188
Nov	206	176	164	128	201
Dez	176	166	171	160	179
Total	1908	1607	1909	1605	1986

FONTE: TROVATI, 1987

TABELA 2.17 - EVAPORAÇÃO MÉDIA MENSAL DO LAGO DE ILHA SOLTEIRA, ANO 1984 (mm)

MÊS	EWT	EWL	EP	EL	ECA
Jan	222	207	196	176	232
Fev	204	185	186	165	210
Mar	159	159	181	181	203
Abr	150	127	185	168	161
Mai	142	112	176	152	142
Jun	136	93	159	120	143
Jul	178	106	180	109	196
Ago	165	109	161	105	177
Set	189	138	163	108	212
Out	253	194	203	137	278
Nov	241	185	219	159	274
Dez	179	153	213	193	185
Total	2218	1768	2222	1773	2413

FONTE: TROVATI, 1987

Segundo Trovati, as diferenças entre EWT e EWL demonstram quanto o modelo leva em conta os efeitos do ambiente criado pela superfície líquida da dimensão do lago (efeitos de escala) como redutor da evaporação que deveria ocorrer numa superfície da dimensão de um tanque situado em ambiente terrestre. Este fato está evidenciado pela diferença dos totais anuais: para o ano de 1983 a diferença entre EWT e EWL foi de 301 mm, e para o ano de 1984 a mesma diferença foi de 450 mm.

Por outro lado, as diferenças entre EWL e EL demonstram como o modelo leva em conta os efeitos da profundidade do lago e das mudanças de armazenamento de calor da superfície do lago. Em termos anuais verifica-se, pela diferença dos valores EWL e EL, que as mudanças de armazenamento de calor na subsuperfície do lago são insignificantes. Entretanto, pela análise mensal pode-se verificar a sazonalidade daqueles efeitos no período de

abril a junho, principalmente, o que torna claro a necessidade de se considerar os efeitos da profundidade e do armazenamento de calor no lago.

Aplicando diversos métodos propostos pela UNESCO, no "Guía Metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur", MATTOS e VILLELA (1987) determinaram a evapotranspiração real na bacia do Rio Paraíba do Sul, usando os dados de 17 estações climatológicas no período de 1965 a 1979. Além dos valores medidos em tanque classe A, foram utilizados os métodos de Thornthwaite e Mather, Turc, Avellán e Penman (UNESCO, 1982). A média de 15 anos para evapotranspiração real segundo cada um dos métodos propostos e para cada uma das estações é apresentada na tabela 2.18.

TABELA 2.18 - EVAPORAÇÃO DE TANQUE E EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL MÉDIA ANUAL (mm)

ESTAÇÃO	TANQUE	THORNTH	TURC	AVELLÁN	PENMAN
Água Limpa (MG)	636,6	965,3	1022,1	853,9	902,0
Cach. do Itapemirim (ES)	905,3	982,1	945,9	1273,4	1094,9
Juiz de Fora (MG)	847,5	876,7	1010,3	746,0	982,2
Barbacena (MG)	722,6	792,6	918,3	625,0	929,6
Campos (RJ)	804,5	970,8	951,3	2348,8	1142,5
São Lourenço (MG)	794,1	904,3	1015,5	702,3	910,6
Resende (RJ)	741,1	990,1	1089,5	881,6	975,2
Nova Friburgo (RJ)	614,2	803,0	860,4	631,8	732,0
Barreirinha (RJ)	697,3	889,1	1007,9	736,9	970,0
Tinguá (RJ)	668,9	1142,2	1278,8	1457,1	-
Mirante Santana (SP)	977,7	899,2	975,1	709,8	1003,5
Taubaté (SP)	919,3	959,9	1014,8	768,0	913,3
Carmo (RJ)	868,6	1070,0	1136,7	932,8	-
São Paulo (SP)	917,5	885,6	1008,3	745,0	-
Sta. Maria Madalena (RJ)	603,0	937,9	1016,0	748,9	-
Vassouras (RJ)	892,1	939,5	981,4	812,2	-
Teresópolis (RJ)	461,5	876,6	1124,9	863,8	-

FONTE: MATTOS e VILLELA, 1987

Mattos e Villela constataram algumas distorções principalmente no método de Avellán. Nas estações de lugares baixos, (Cachoeiro do Itapemirim, Campos e Tinguá), o método superestima a evapotranspiração; o contrário ocorre para a estação mais alta (Barbacena). Os resultados de tanque também apresentaram distorções, principalmente nas estações Água Limpa, Tinguá, Santa Maria Madalena e Teresópolis. Dos métodos aplicados para a determinação da evapotranspiração real, o de Thornthwaite e Mather foi julgado como o mais recomendável, por não apresentar grandes distorções e pela simplicidade de uso. O método de TURC, embora simples e fácil de aplicar foi considerado muito ruim pelos autores.

O trabalho de BARTH (1987) apresenta dados do balanço hídrico brasileiro a nível nacional e regional. Os resultados da evapotranspiração real para as grandes regiões hidrográficas do Brasil estão mostrados na tabela 2.19. Os valores em itálico se referem aos resultados publicados pelo DNAEE (BRASIL, 1992) para as mesmas bacias. Os períodos das séries históricas dos dados não foram publicados nos trabalhos citados.

TABELA 2.19 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL DAS REGIÕES  
HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS

REGIÃO HIDROGRÁFICA	ÁREA (km <sup>2</sup> )	EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (mm/ano)	
Amazonas total	6112000	1506	1382
Amazonas brasileiro	3844191	1146	1250
Tocantins	757000	1297	1168
Atlântico Norte	242000	1355	1431
Atlântico Nordeste	787000	997	1150
São Francisco	634000	836	774
Atlântico Leste (1)	242000	928	806
Atlântico Leste (2)	303000	843	847
Paraná	877000	1035	989
Paraguai	368000	1285	1259
Uruguai	178000	984	832
Atlântico Sul	224000	839	789
Brasil	8511928	1087	1195

(1) Do Japaratuba (SE) ao Pardo (BA)

(2) Do Jequitinhonha (MG/BA) ao Paraíba do Sul (SP/MG/RJ)

FONTE: BARTH, 1987 e BRASIL, 1992

Para Barth, os dados da tabela 2.19 mostram a grande heterogeneidade dos regimes hidrológicos ao longo de todo o país.

No trabalho de MOLLE (1989), sobre a variabilidade interanual da evaporação para o Nordeste semi-árido, encontram-se valores de evaporação medidos em tanques classe A comparados com valores de evapotranspiração potencial calculada pela fórmula de Hargreaves para 11 postos. A tabela 2.20 mostra estes resultados.

TABELA 2.20 - EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL  
MÉDIA ANUAL PARA O NORDESTE SEMI-ÁRIDO (mm)

ESTAÇÃO	PERÍODO	TANQUE	HARGREAVES
Patos (PB)	75/83	3333	1900
Sumé (PB)	73/88	2892	1706
Petrolina (PE)	74/88	3151	2080
Ouricuri (PE)	75/86	2796	2013
Irecê (BA)	71/88	2858	1629
Barbalha (CE)	67/88	2704	1893
Tauá (CE)	78/88	3146	1919
Cruzeta (RN)	72/88	3299	1815
Souza (PB)	69/88	2936	1967
Caicó (RN)	64/88	3181	1813
Florânia (RN)	64/83	2884	1932

FONTE: MOLLE, 1989

Os resultados obtidos por Molle mostram que a evapotranspiração potencial de Hargreaves é pequena se comparada às observações em tanque classe A. Segundo Molle a evaporação anual média do tanque classe A no Nordeste semi-árido é da ordem de 3000 mm, sendo que dois terços do total ocorrem no período de junho a dezembro.

No trabalho de SUGAI e GUGELMIN (1990), de quantificação da evaporação líquida na área do reservatório de Foz do Areia no Estado do Paraná, encontram-se resultados de evaporação a partir de dados de tanque classe A e evapotranspirações reais a partir do balanço hídrico para o período de 1983 a 1988.

As evaporações foram obtidas a partir de observações diárias do tanque classe A e do evaporímetro Piché da estação de Foz do Areia. Para a avaliação das evapotranspirações foi utilizado o método do balanço hídrico calculado em 3 bacias hidrográficas de afluentes localizados na bacia incremental

entre Foz do Areia e União da Vitória, com características meteorológicas, geológicas e de uso do solo similares às da região do reservatório de Foz do Areia. As bacias hidrográficas selecionadas são as do rio Areia em Madeira Gavazzoni, com área de drenagem igual a 1010 km<sup>2</sup>, do rio Palmital em Fazenda Maracanã, com área de drenagem de 320 km<sup>2</sup>, e do rio Jangada em Jangada do Sul, com área de drenagem de 880 km<sup>2</sup>. Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 2.21.

TABELA 2.21 - EVAPORAÇÃO POTENCIAL E EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL ANUAL EM FOZ DO AREIA - PR (mm)

ANO	EVAPOTRANSPIRAÇÃO			EVAPORAÇÃO	
	BACIA DO AREIA	BACIA DO PALMITAL	BACIA DO JANGADA	TANQUE	PICHÉ
1983	503,4	663,7	821,2	737,2	710,7
1984	1093,1	1076,5	851,6	782,9	847,1
1985	786,8	694,5	863,7	888,9	874,0
1986	1160,9	936,2	1027,6	873,6	925,1
1987	987,6	757,4	967,8	857,7	972,5
1988	848,0	855,3	966,8	895,0	909,8
Média	910,0	833,9	916,5	839,2	873,2

FONTE: SUGAI e GUGELMIN, 1990

Segundo os autores, a longo prazo as perdas por evaporação das superfícies líquidas, na bacia incremental entre Foz do Areia e União da Vitória, praticamente se equilibram com as perdas por evapotranspiração das áreas alagadas.

MATTOS (1991), estudando a bacia do Jacaré-Guaçu no centro-norte de São Paulo, obteve valores de evapotranspiração real e potencial. A evapotranspiração real foi determinada segundo os métodos Advecção-Aridez, CRAE ("Complementary Relationship Areal Evapotranspiration"), Penman-Monteith e balanço hídrico, e, a evapotranspiração potencial por Penman e Priestley-Taylor. O estudo foi realizado com base em cinco estações climatológicas da referida bacia para o ano de 1983. Os resultados obtidos por Mattos estão indicados na tabela 2.22.

TABELA 2.22 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO ANUAL (mm)

MODELO	EVAPOTRANSPIRAÇÃO
Advecção-Aridez	1233,7
CRAE	1287,9
Penman-Monteith	645,5
Balanço Hídrico	1305,4
Priestley-Taylor	1350,3
Penman	1413,2

FONTE: MATTOS, 1991

Para o autor, os modelos Advecção-Aridez e CRAE produziram bons resultados para a bacia em estudo, e o modelo de Penman-Monteith não é aplicável. O modelo de Penman, por produzir resultados de evapotranspiração potencial, gera valores mais altos, principalmente no período de estiagem.

O trabalho "Balanço Hídrico do Estado de São Paulo" (BRAGA JR, CONEJO e PALOS, 1991) apresenta resultados de evapotranspiração real pelo balanço hídrico (BH) e balanço

hídrico simplificado (BHS), para 21 bacias hidrográficas do Estado de São Paulo, com dados do período 1972 a 1983. A evapotranspiração real obtida a partir de dados diários é chamada de BH, e a evapotranspiração real obtida a partir de dados anuais de BHS. A tabela 2.23 mostra os resultados obtidos.

TABELA 2.23 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PARA O ESTADO DE SÃO PAULO POR BACIA HIDROGRÁFICA (mm/ano)

BACIA HIDROGRÁFICA	BH	BHS
Mantiqueira	980	933
Sapucaí/Grande	973	1018
Rio Grande em Usina Porto Colômbia	973	1012
Alto Pardo/Mogi	964	966
Baixo Pardo/Mogi	981	958
Pardo/Grande	942	996
Rio Grande em Usina Marimbondo	967	980
Turvo/Grande	993	1009
Rio Grande confluência com rio Paraná	975	988
São José dos Dourados	1174	1012
Rio Paraná a montante do rio Tietê	996	911
Alto Tietê	982	982
Piracicaba	823	1002
Tietê/Sorocaba	913	983
Tietê/Jacaré	891	1050
Tietê/Batalha	883	994
Baixo Tietê	871	982
Rio Paraná em Porto Independência	938	995
Aguapeí	974	989
Rio Paraná montante de Boa Esperança	941	994
Peixe/Santo Anastácio	956	1010
Rio Paraná em Ilha dos Pacus	943	996
Alto Paranapanema	853	946
Baixo Paranapanema	870	989
Rio Paraná em Porto São José	924	990
Paraíba do Sul	920	940
Ribeira do Iguape/Litoral Sul	770	844
Baixada Santista	875	939
Litoral Norte	860	943
Vertente Marítima	793	866
Estado de São Paulo	912	976

FONTE: BRAGA JR, CONEJO e PALOS, 1991

No mesmo trabalho, foram definidas isolinhas de evaporação potencial para o Estado de São Paulo, com base nos dados medidos em evaporímetros Piché (9 estações) e em tanques classe A (21 estações), no período 1960 a 1985. Os resultados obtidos estão resumidos em forma tabular na tabela 2.24.

TABELA 2.24 - EVAPORAÇÃO POTENCIAL MÉDIA MENSAL (mm)

ESTAÇÃO	EVAPORAÇÃO POTENCIAL	NÚMERO DE ANOS	APARELHO DE MEDIÇÃO
Pontal	145,5	8	Tanque
Capivara	160,0	7	Tanque
Ilha Solteira	177,7	7	Tanque
Água Vermelha	173,1	7	Tanque
Votuporanga	149,6	12	Tanque
Salto Grande	145,4	13	Tanque
Promissão	170,6	7	Tanque
Jurumirim	111,7	13	Tanque
Ibitinga	155,6	12	Tanque
Bariri	142,7	13	Tanque
Barra Bonita	130,3	13	Tanque
Botucatu	118,5	11	Tanque
Pradópolis	139,4	10	Tanque
Juquiá	77,5	9	Tanque
Campininha	114,2	12	Tanque
Limoeiro	124,6	12	Tanque
Cidade Universitária	112,9	10	Tanque
Graminha	126,3	13	Tanque
Casa Grande	70,9	10	Tanque
Campos do Jordão	83,3	11	Tanque
Pindamonhangaba	120,6	7	Tanque
Maringá (PR)	149,7	7	Piché
Presidente Prudente	162,2	11	Piché
Londrina (PR)	88,5	25	Piché
Castro (PR)	72,9	16	Piché
Jacarezinho (PR)	105,2	22	Piché
Curitiba (PR)	70,1	22	Piché
Cananéia	134,7	21	Piché
Sorocaba	97,3	8	Piché
Paraibuna	109,7	6	Piché

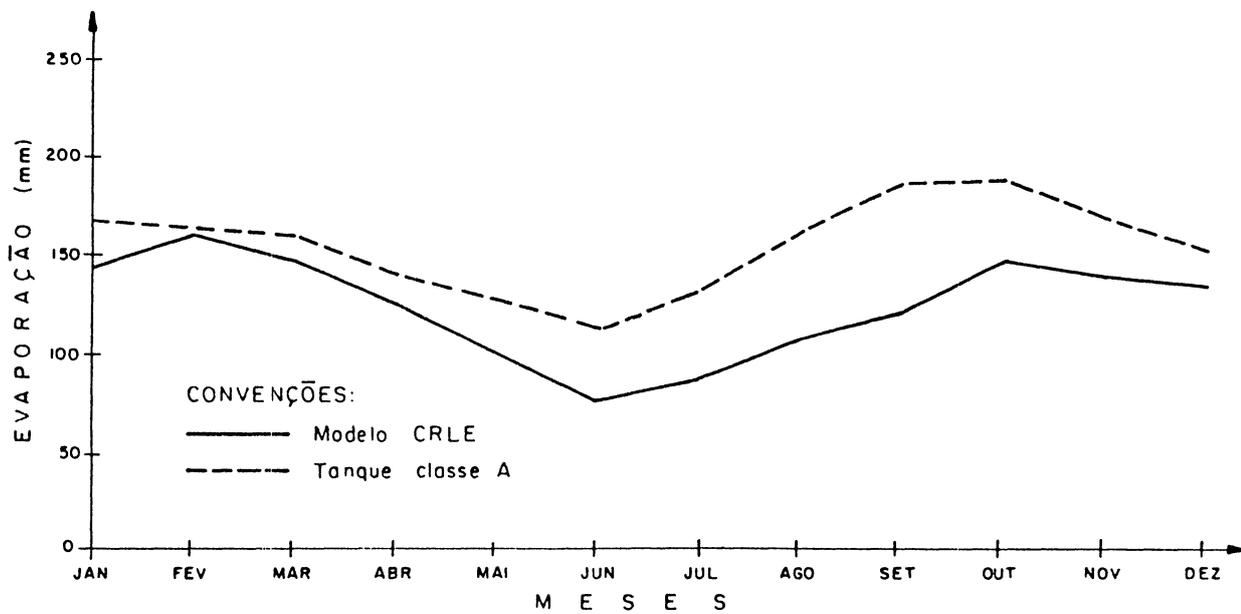
FONTE: BRAGA JR, CONEJO e PALOS, 1991

Como conclusão do trabalho, os autores sugerem o uso do balanço hídrico simplificado para avaliação da evapotranspiração real, pela facilidade de uso e por produzir resultados muito próximos aos obtidos pelo balanço hídrico.

No trabalho realizado pela Divisão de Hidrometeorologia Operacional da CEMIG (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 1991) são feitas comparações entre o modelo CRLE e o tanque classe A, para a estimativa da evaporação do reservatório de Três Marias situado no rio São Francisco. As estações evaporimétricas usadas foram a de Três Marias com dados desde 1974, e Porto Pará com dados a partir de 1976. Os resultados obtidos estão mostrados nas figuras 2.1 e 2.2.

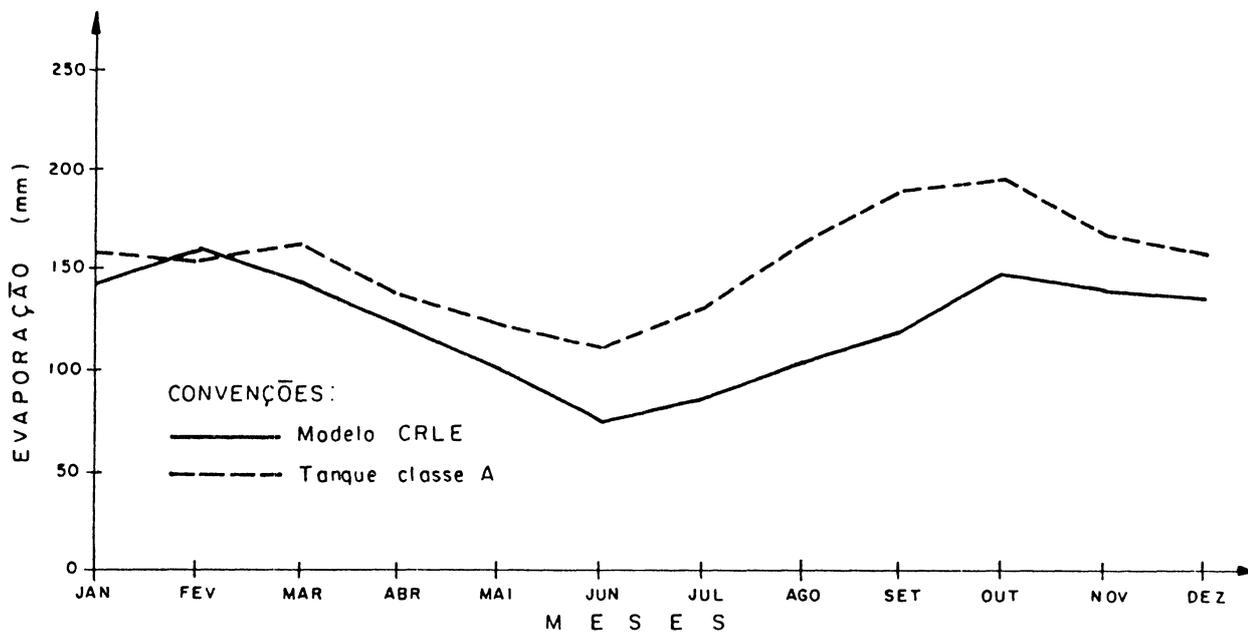
Segundo os autores, apesar de não existirem estimativas de evaporação pelos métodos do balanço de energia e do balanço hídrico para o local, o modelo CRLE em comparação com o tanque classe A apresentou bons resultados.

FIGURA 2.1 - EVAPORAÇÃO MÉDIA MENSAL EM TRÊS MARIAS



FONTE: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 1991

FIGURA 2.2 - EVAPORAÇÃO MÉDIA MENSAL EM PORTO PARÁ



FONTE: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 1991

Outros resultados de evaporação anual, em quatro estações meteorológicas do Estado de Minas Gerais, obtidos pelos mesmos autores, estão publicados na Nota Técnica de 03/92 (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 1992) e estão mostrados na tabela 2.25.

TABELA 2.25 - EVAPORAÇÃO ANUAL DE LAGO (mm)

LOCAL	TANQUE CLASSE A	CRLE
Três Marias (MG)	1859	1500
Volta Grande (MG)	1726	1500
São Simão (MG)	2148	1600
Emborcação (MG)	2223	1450

FONTE: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 1992

Para os autores, a evaporação de lago anual se situa no intervalo de 1200 mm a 1700 mm em qualquer estação do Estado de Minas Gerais.

No trabalho de ARAÚJO et al. (1993) são apresentados valores de evapotranspiração potencial pelo método de Hargreaves e dados de evaporação em tanque classe A para as regiões do Agreste e da Mata de Pernambuco. Os resultados obtidos para os oito postos estudados estão mostrados na tabela 2.26.

TABELA 2.26 - VALORES DE EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL ANUAL EM PERNAMBUCO (mm)

ESTAÇÃO	EVAPOTRANSPIRAÇÃO HARGREAVES	EVAPORAÇÃO TANQUE CLASSE A
Recife	1571	1599
Vitória Santo Antão		1680
Surubim	1665	1642
Caruaru	1613	1615
São Bento do Una		1619
Belo Jardim	1435	1603
Garanhuns	1411	1478
Arcoverde	1814	1605

FONTE: ARAÚJO et al, 1993

Com base nos erros percentuais, os autores apontam o método de Hargreaves como adequado para o cálculo da evapotranspiração potencial nas regiões do Agreste e da Mata do Estado de Pernambuco.

Para finalizar este capítulo, pode-se ressaltar dois pontos importantes: i) a grande contribuição de cada um dos trabalhos descritos, principalmente a nível local; e, ii) a necessidade da realização de trabalhos englobando grandes regiões, como se pretende nesta dissertação.

### 3 AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO

Do volume total de água precipitado sobre a parte terrestre da terra, cerca de 70% retorna à atmosfera por evaporação e transpiração, mostrando a importância destes fenômenos no ciclo hidrológico. A evaporação se processa em quase todas as fases do ciclo, sendo a responsável pelo equilíbrio do ciclo hidrológico.

Aborda-se neste capítulo o fenômeno da evaporação de superfícies líquidas. A transpiração e a evapotranspiração são discutidas no capítulo 4 deste trabalho.

#### 3.1 FATORES DETERMINANTES DA EVAPORAÇÃO

##### 3.1.1 Evaporação de Superfícies Líquidas

A evaporação representa a passagem da água na fase líquida para vapor. Ocorre quando as moléculas da massa de água vizinhas à superfície sofrem colisões que aumentam a sua energia cinética acima da energia de ligação e se libertam da superfície do líquido.

A taxa de evaporação depende de muitos fatores, a maior parte conhecidos, mas freqüentemente de difícil mensuração,

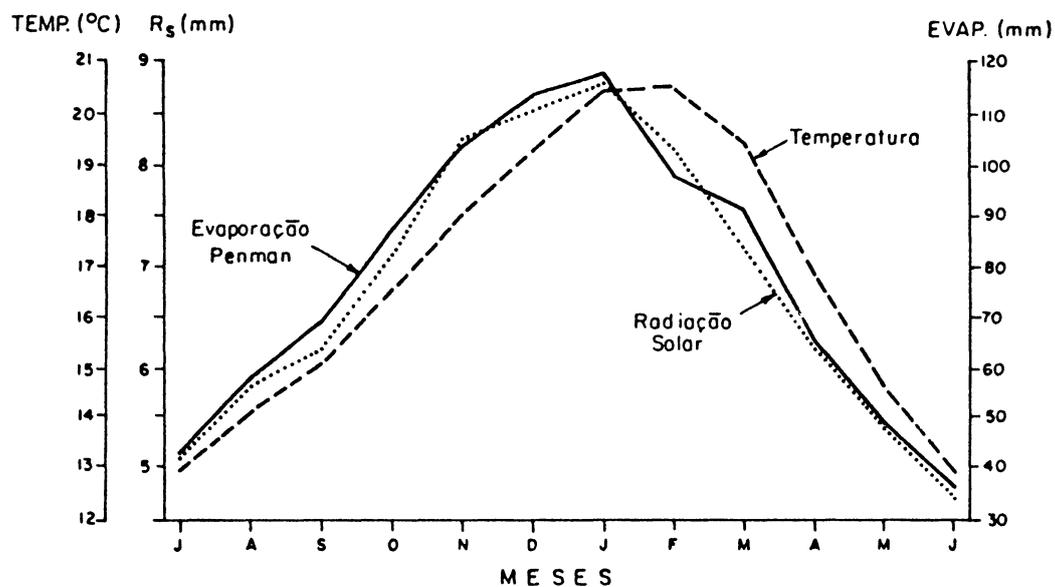
principalmente devido a turbulência atmosférica e dificuldades técnicas na medição das variáveis meteorológicas sobre a superfície líquida. Os fatores intervenientes mais importantes são a radiação solar, as temperaturas do ar e da água, a velocidade do vento, a pressão parcial do vapor de água no ar e características físicas do próprio lago (rugosidade, albedo, extensão, profundidade).

A radiação solar se constitui no fator isolado mais importante, uma vez que o processo de evaporação é, fundamentalmente, um processo dependente da energia disponível para a mudança do estado físico da água. Esta mudança de estado requer uma quantidade de calor, chamada calor latente de evaporação, da ordem de 590 calorias (2470 J) para cada grama de água evaporada a uma temperatura de 15°C (GEIGER, 1961).

As temperaturas do ar e da água estão fortemente associadas à radiação solar e, portanto, também se correlacionam positivamente com a evaporação. A temperatura da água influi na intensidade com que as moléculas deixam a superfície líquida e passam para o ar. A variação da temperatura da superfície da água em períodos curtos pode exercer profundo efeito na quantidade de água evaporada.

A figura 3.1 mostra a relação entre evaporação, radiação e temperatura para Curitiba, PR. Nessa figura observa-se que a evaporação está em fase com a radiação, isto é, o máximo de evaporação ocorre ao mesmo tempo que o máximo de radiação solar, enquanto que o máximo de temperatura ocorre com atraso.

FIGURA 3.1 - RELAÇÃO ENTRE EVAPORAÇÃO, RADIAÇÃO SOLAR E TEMPERATURA PARA CURITIBA - PR



O efeito do vento na evaporação é exercido pela remoção e renovação do ar acima da superfície evaporante. O vento retira da camada acima da superfície evaporante o ar saturado ou próximo a saturação, ficando sobre a mesma superfície ar mais seco, o que determina a manutenção do processo evaporativo. A relação entre o vento e evaporação é, entretanto, limitada. Acima de uma determinada velocidade a evaporação torna-se independente da velocidade do vento. O efeito da ação do vento é mais bem pronunciada em grandes massas de água. Para HORTON em 1917 e HONK em 1951 (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1966), ventos da ordem de 8 a 11 m/s representam o valor limite da velocidade do vento acima do qual a ação do vento é constante.

As moléculas de água evaporadas chocam-se contra a superfície do líquido, exercendo uma pressão, que é conhecida

como pressão de vapor. Mais corretamente, é apenas a pressão parcial de vapor de água, porque na atmosfera existem outros gases que exercem, cada um, uma pressão parcial. As moléculas que evaporam colidem com as do ar e algumas retornam para a água. Quando o número de moléculas que saem é igual ao número de moléculas que retornam, é atingido um estado de equilíbrio entre a pressão exercida pelas moléculas que deixam a água e as moléculas da atmosfera. Este fenômeno é conhecido por saturação. Assim, a evaporação é proporcional à diferença entre a pressão de vapor saturado à temperatura da água e à pressão de vapor do ar. Isto quer dizer que se aumentarmos a umidade relativa do ar, diminuimos a habilidade de absorver vapor de água, ocasionando uma diminuição na taxa de evaporação. A diferença entre pressão de vapor saturado à temperatura da água e à pressão de vapor do ar, conhecida como déficit de saturação, é um dos parâmetros utilizados na equação de Dalton, que é a mais antiga equação de estimativa da evaporação. Esta expressão está apresentada na seção 3.2.3 deste trabalho.

Existem outros fatores que influenciam a evaporação, entre eles: i) o armazenamento de energia, especialmente em reservatórios ou evaporímetros de maior profundidade. O calor armazenado no lago nos meses mais quentes será liberado posteriormente, provocando um retardo na evaporação e conduzindo a um acomodamento das camadas de água ao longo da direção vertical, fenômeno esse conhecido por estratificação térmica; ii) a pressão atmosférica, a redução da pressão equivale a um aumento de altitude e conseqüentemente um aumento na taxa de evaporação, uma vez que nas maiores altitudes

existem menos moléculas na atmosfera facilitando que outras deixem a superfície; iii) tamanho e profundidade da massa de água; iv) presença de sais ou outras impurezas, a dissolução de sais na água aumenta o peso específico da mistura diminuindo a taxa de evaporação. Para cada 1% de aumento na concentração de sal, diminui 1% a taxa de evaporação; v) presença de ondas na superfície da água, influenciando na rugosidade da superfície evaporante.

### 3.1.2 Evaporação de Solos Descobertos

A evaporação da água do solo é, em princípio, governada pelos mesmos fatores que influenciam a evaporação de uma superfície livre de água. A diferença reside na natureza da superfície evaporante, ou seja, nas massas de água não existem restrições de disponibilidade de água para evaporação, ao passo que no solo a água nem sempre está disponível para ser evaporada. A presença de um lençol freático próximo à superfície do solo, que possibilita suprimento constante de água no processo de evaporação, ocorre em áreas limitadas. O mais comum é que o lençol freático esteja a uma profundidade tal que não interfira nos processos que ocorrem na superfície.

Partindo de um solo inicialmente saturado, podemos considerar dois estágios. No primeiro estágio, com solo úmido, não há limitação de suprimento de água e a evaporação é função dos mesmos fatores que controlam a evaporação de uma superfície livre de água. A medida que a superfície do solo seca, o

suprimento de água do solo é restringido e as características do solo começam a influenciar a taxa de evaporação. A principal variável que passa a atuar é a condutividade hidráulica que depende da estrutura e textura do solo. A partir desse momento, a evaporação passa a ser menor do que a evaporação que ocorreria nas mesmas condições meteorológicas com suprimento ilimitado de água.

### 3.2 AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO

Existem muitos métodos e fórmulas empíricas para a avaliação da evaporação, ficando muitas vezes difícil decidir qual o método mais adequado. O uso acaba sendo condicionado pela familiaridade e preferência pessoal do pesquisador, ou pela natureza dos dados disponíveis. A credibilidade e universalidade das equações de estimativa da evaporação aumenta à medida que elas se aproximam da realidade física do processo de evaporação. Contudo, a modelagem física detalhada do processo conduz ao aumento do número de dados necessários e nem sempre disponíveis. De maneira aproximada podemos classificar os métodos de avaliação nos seguintes grandes grupos:

- Método do Balanço de Massa (Balanço Hídrico).
- Métodos do Balanço de Energia.
- Métodos de Transferência de Massa.
- Métodos Combinados.
- Fórmulas Empíricas.
- Medidas Diretas.

Apresenta-se a seguir, um resumo de algumas técnicas comumente encontradas na literatura para avaliação da evaporação.

### 3.2.1 Avaliação da Evaporação pelo Balanço Hídrico

A avaliação da evaporação pelo balanço hídrico consiste basicamente na aplicação da equação da continuidade ao lago ou reservatório, como mostra a equação (3.1).

$$EV = P + (I - O + \Delta S) / A \quad (3.1)$$

onde:

EV = altura total evaporada no tempo  $\Delta t$  (cm);

P = altura total precipitada sobre o reservatório no tempo  $\Delta t$  (cm);

I = volume de água que entra no reservatório, no tempo  $\Delta t$ , considerando fluxos superficial e subterrâneo ( $\text{cm}^3$ );

O = volume de água que sai do reservatório, no tempo  $\Delta t$ , considerando fluxos superficial e subterrâneo ( $\text{cm}^3$ );

$\Delta S$  = variação do volume de água do reservatório, no tempo  $\Delta t$  ( $\text{cm}^3$ );

A = área média do reservatório no intervalo de tempo  $t$  a  $t+\Delta t$  ( $\text{cm}^2$ ).

Teoricamente é possível utilizar o balanço hídrico para determinação da evaporação em qualquer reservatório. Entretanto, a dificuldade de se medir na prática algumas das grandezas intervenientes, principalmente o volume afluente I, tem restringido o uso do balanço hídrico na avaliação da evaporação de lagos e reservatórios. Além disso, pequenos erros na avaliação dos volumes podem conduzir a consideráveis erros no valor final da evaporação, principalmente para intervalos de tempo inferiores a 1 mês.

### 3.2.2 Avaliação da Evaporação pelo Método do Balanço de Energia

A evaporação é basicamente um processo de transformação de energia, portanto é possível a aplicação do princípio da conservação da energia para estimar a transferência de água para a atmosfera na forma de vapor.

O balanço de energia para um lago ou reservatório, é dado por:

$$\Delta Q = Q_s - Q_{sr} - Q_{lw} - Q_h - Q_e + Q_v \quad (3.2)$$

onde:

$\Delta Q$  = variação da energia armazenada no lago ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ );

$Q_s$  = radiação solar incidente ou radiação global  
( $\text{cal}/\text{cm}^2$ );

$Q_{sr}$  = radiação solar refletida ( $Q_{sr} = \alpha Q_s$ ) (cal/cm<sup>2</sup>);

$\alpha$  = albedo;

$Q_{lw}$  = radiação da massa de água para a atmosfera sob a forma de ondas longas (cal/cm<sup>2</sup>);

$Q_h$  = energia perdida para a atmosfera na forma de calor sensível (por efeitos de turbulência) (cal/cm<sup>2</sup>);

$Q_e$  = energia utilizada na evaporação (cal/cm<sup>2</sup>);

$Q_v$  = energia recebida pelo lago por advecção (positiva quando fornece energia e negativa em caso contrário) (cal/cm<sup>2</sup>).

A parcela da radiação que não é refletida nem irradiada é chamada de radiação líquida ( $Q_n$ ), sendo dada por:

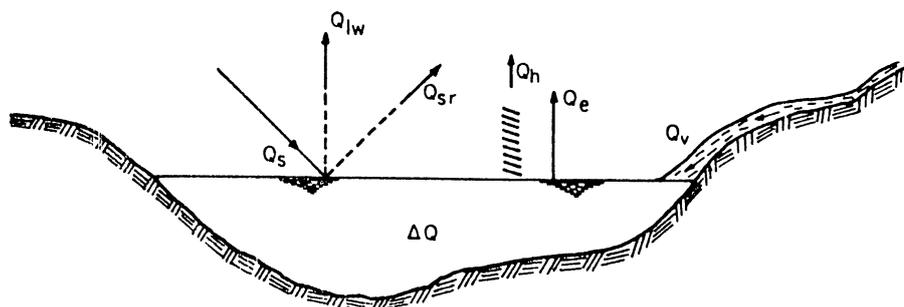
$$Q_n = Q_s - Q_{sr} - Q_{lw} \quad (3.3)$$

Assim a expressão do balanço de energia fica:

$$\Delta Q = Q_n - Q_h - Q_e + Q_v \quad (3.4)$$

O método do balanço de energia, bastante rigoroso e detalhado, raras vezes é usado na prática, devido à dificuldade de obtenção de todos os dados necessários à sua aplicação. Detalhes sobre a obtenção de cada uma destas grandezas estão em LENCASTRE e FRANCO (1984), RAUDKIVI(1979) e DIAS (1986). A figura 3.2 ilustra a equação de balanço de energia.

FIGURA 3.2 - ESQUEMA DO BALANÇO DE ENERGIA



FONTE: LENCASTRE e FRANCO, 1984

A expressão (3.4) exprime o princípio da conservação de energia, mas negligencia a energia absorvida ou liberada devida a processos químicos e biológicos que ocorrem na interface água e solo e as perdas que ocorrem devido a turbulência gerada pelas ondas. Como estes valores são muito pequenos se comparados aos outros termos do balanço, podem ser desprezados sem maiores problemas.

Com base no balanço de energia, a evaporação é dada por:

$$EV = \frac{Q_n + Q_v - \Delta Q}{\rho L (1 + B)} \quad (3.5)$$

onde:

EV = evaporação (cm);

$Q_n$  = radiação líquida ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ );

$Q_v$  = energia recebida pelo lago por advecção ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ );

$\Delta Q$  = variação da energia armazenada no lago ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ );

$\rho$  = massa específica da água ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

L = calor latente de evaporação ( $\cong 590 \text{ cal/g}$ );

B = razão de Bowen, dada por:

$$B = \frac{Q_h}{Q_e} = \gamma \frac{(T_o - T_a)}{(e_o - e_a)} \quad (3.6)$$

onde:

$T_o$  = temperatura da superfície líquida ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_a$  = temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );

$e_o$  = pressão de saturação do vapor de água à temperatura da água (mb);

$e_a$  = pressão do vapor de água à temperatura do ar (mb);

$\gamma$  = constante psicrométrica, ( $\text{mb}/^{\circ}\text{C}$ ), dada por:

$$\gamma = c_p * P / ( 0,622 * L ) \quad (3.7)$$

onde:

$c_p$  = calor específico a pressão constante ( $\text{cal}/\text{g } ^{\circ}\text{C}$ );

P = pressão atmosférica local (mb).

O uso da razão de Bowen para determinação da evaporação elimina a necessidade do conhecimento do termo que envolve o fluxo de calor sensível que não é usualmente medido.

### 3.2.3 Avaliação da Evaporação pelos Métodos da Transferência de Massa

A relação entre evaporação e pressão de vapor, inicialmente proposta por Dalton em 1802, é a mais antiga fórmula de avaliação da evaporação. Esta relação, conhecida como lei de Dalton, é a base dos métodos de transferência de massa, sendo dada por:

$$EV = K ( e_o - e_a ) \quad (3.8)$$

onde:

EV = evaporação ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ );

K = coeficiente empírico (dimensional), que depende de vários fatores, principalmente da velocidade do vento ( $\text{kg/m}^2\text{s Pa}$ );

$e_o$  = pressão de saturação do vapor de água à temperatura da água (Pa);

$e_a$  = pressão do vapor de água à temperatura do ar (Pa).

Encontram-se na literatura diversas fórmulas empíricas para avaliação do coeficiente K, em geral em função da velocidade do vento sobre a superfície. A tabela 3.1 extraída de DIAS (1986), mostra algumas destas fórmulas.

TABELA 3.1 - VALORES DO COEFICIENTE K ( $\text{kg/m}^2\text{s Pa}$ ) EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO V (m/s)

AUTOR	ANO	K
Penman	1948	3,01 + 1,62 V
Sellers	1966	0,506 + 1,44 V
Van Bavel	1966	5,45 V
Kohler e Parmele	1967	1,57 + 1,35 V
De Bruin	1978	1,18 + 0,853 V
Morton	1983	10

FONTE: DIAS, 1986

Muitas fórmulas empíricas propostas na literatura para avaliação da evaporação são baseadas na lei de Dalton. Entre elas pode-se citar as fórmulas de Rohwer, de Meyer, dos Serviços Hidrológicos da U.R.S.S., e de Fitzgerald (PINTO et al., 1976).

O maior problema para a aplicação da lei de Dalton e das fórmulas derivadas reside no fato da necessidade do conhecimento da temperatura da água e características da camada de ar muito próximo da superfície líquida. Essas informações não são em geral medidas, e por essa razão são extrapoladas a partir de informações meteorológicas tradicionais nas vizinhanças do lago. Além disso, as equações empíricas geralmente são obtidas em localidades com características climáticas diferentes, e pouco se sabe sobre a sua aplicabilidade para as condições climáticas do Brasil.

Outra forma de utilizar a lei de Dalton para estimar a evaporação é reescrever a equação (3.8) da seguinte forma (RAUDKIVI, 1979):

$$E = N f_1(w) (e_o - e_a) / f_2(k) \quad (3.9)$$

onde:

$N =$  constante;

$f_1(w) =$  função da velocidade do vento;

$f_2(k) =$  função da rugosidade da superfície.

O método da transferência de massa definido conforme a equação (3.9) é também conhecido como método aerodinâmico.

Utilizando o conceito da camada limite atmosférica foram propostas diversas equações para o cálculo de evaporação, sendo as expressões de Sverdrup e de Thornthwaite e Holzman as mais conhecidas (RAUDKIVI, 1979). Estas expressões, no entanto, têm seu uso bastante restrito devido à dificuldade de obtenção dos dados necessários à sua aplicação.

Equação de Sverdrup:

$$EV = \frac{0,623 \rho K^2 v_8 (e_o - e_8)}{P (\ln 800/S)^2} \quad (3.10)$$

Equação de Thornthwaite e Holzman:

$$EV = \frac{0,623 \rho K^2 (v_8 - v_2) (e_2 - e_8)}{P (\ln 800/200)^2} \quad (3.11)$$

onde:

$EV =$  evaporação (cm/s);

$\rho =$  densidade do ar ( $g/cm^3$ );

$K$  = constante de von Kármán (0,4);

$P$  = pressão atmosférica (mb);

$S$  = altura de rugosidade (cm);

$e_0$  = pressão de saturação do vapor de água à temperatura da água (mb);

$e_2$  e  $e_8$  = pressão de vapor de água à altura de 2 m e 8 m respectivamente (mb).

$v_2$  e  $v_8$  = velocidade do ar a 2 m e 8 m da superfície, respectivamente (cm/s);

#### 3.2.4 Avaliação da Evaporação pelos Métodos Combinados

Os métodos combinados são assim denominados porque resolvem simultaneamente o balanço de energia e o balanço aerodinâmico, eliminando com isso a necessidade do conhecimento da temperatura da superfície de água que, em geral, não é disponível nas estações meteorológicas. Dentre os métodos combinados destaca-se o método de Penman (PENMAN, 1948).

A expressão de Penman foi obtida a partir da equação do balanço de energia (equação 3.4), desprezando a advecção e as variações de energia  $\Delta Q$  no lago (WILSON, 1983):

$$Q_n = Q_h + Q_e \quad (3.12)$$

Usando a razão de Bowen  $B = Q_h / Q_e$ , equação (3.6), vêm:

$$Q_n = Q_e ( 1 + B ) \quad (3.13)$$

Dividindo-se (3.13) por  $\rho L$ , e considerando a energia gasta na evaporação  $Q_e = \rho L E$ , e definindo a radiação útil pela expressão  $H = Q_n / \rho L$ , têm-se em altura equivalente de água (cm):

$$EV = H / ( 1 + B ) \quad (3.14)$$

A radiação útil  $H$  nada mais é do que a radiação líquida expressa em unidades de evaporação, ou seja, corresponde a altura evaporada se toda a radiação líquida fosse usada no fenômeno da evaporação.

Substituindo a equação (3.6) em (3.14), vêm:

$$EV = \frac{H}{1 + \gamma \frac{T_o - T_a}{e_o - e_a}} \quad (3.15)$$

Definindo  $\Delta = \frac{d(e^*)}{dT} \approx \frac{e_o - e_a^*}{T_o - T_a}$ , com  $e_a^*$  a pressão de saturação de vapor de água à temperatura do ar.

Levando-se  $T_o - T_a = \frac{e_o - e_a^*}{\Delta}$  em (3.15) e fazendo

$$(e_o - e_a^*) = (e_o - e_a) - (e_a^* - e_a), \text{ vêm:}$$

$$EV = \frac{H}{1 + \frac{\gamma}{\Delta} \left[ 1 - \frac{(e_a^* - e_a)}{(e_o - e_a)} \right]} \quad (3.16)$$

Da equação do balanço aerodinâmico, equação (3.9), resulta:

$$EV = \frac{N f_1(w)}{f_2(k)} (e_o - e_a) = f(u) (e_o - e_a) \quad (3.17)$$

sendo  $f(u)$  função da velocidade do vento e da rugosidade da superfície.

Representando por  $E_a$  a evaporação hipotética que ocorreria se a temperatura da água fosse igual a do ar, vêm:

$$E_a = f(u) (e_a^* - e_a) \quad (3.18)$$

Dividindo-se (3.18) por (3.17), resulta:

$$\frac{E_a}{EV} = \frac{e_a^* - e_a}{e_o - e_a} \quad (3.19)$$

Finalmente, substituindo (3.19) em (3.16), e explicitando EV, resulta a equação de Penman para o cálculo da evaporação potencial:

$$EV = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} H + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (3.20)$$

onde:

EV = evaporação (cm);

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor (mb/°C);

$\gamma$  = constante psicrométrica (mb/°C);

H = termo do balanço de energia ou radiação útil (cm);

$E_a$  = termo do balanço aerodinâmico (cm).

A radiação útil H é comumente estimada em função de parâmetros climáticos, de características da superfície (albedo) e da latitude local. Todavia, se for possível medir o termo H ao invés de estimá-lo, os resultados certamente serão mais precisos. O termo  $E_a$  considera a contribuição do vento e do déficit de saturação do ar no processo.

Existem diversas formas de se avaliar os termos H e  $E_a$ . Neste trabalho foram usadas as expressões apresentadas por FRERE (1979).

A partir da fórmula apresentada por Penman surgiram inúmeras expressões derivadas, entre elas podemos citar a de Priestley-Taylor.

A fórmula de Priestley-Taylor de avaliação da evaporação de superfícies saturadas elimina o termo aerológico da evaporação obtida pela fórmula de Penman, sendo dada por:

$$EV = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} H \quad (3.21)$$

onde:

EV = evaporação (cm);

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor (mb/°c);

$\gamma$  = constante psicrométrica (mb/°c);

H = termo do balanço de energia (cm);

$\alpha$  = constante.

Para a média de um grande número de locais o valor de  $\alpha$  recomendado pelos autores é 1,26.

A equação de Priestley-Taylor estima a evaporação que ocorre se a superfície onde foram medidas as variáveis meteorológicas é transformada em superfície saturada com as correspondentes alterações nas condições atmosféricas. A fórmula de Penman, ao contrário, estima a evaporação para o caso em que a superfície fica saturada mas as condições atmosféricas não se alteram. No limite, isto é, para grandezas meteorológicas medidas sobre uma superfície saturada, os resultados de ambas as fórmulas são iguais.

### 3.2.5 Avaliação da Evaporação pelo Modelo CRLE

O modelo CRLE ("Complementary Relationship Lake Evaporation") se propõe estimar a evaporação em lagos a partir de observações climatológicas medidas em terra. O modelo se

baseia na relação complementar entre evaporação potencial e real (MORTON, 1979; MORTON, 1983b; MORTON, 1986). Segundo o conceito da relação complementar, introduzido por BOUCHET em 1963 (GRANGER, 1989), existe uma resposta complementar igual e de sinal contrário entre evaporação potencial e real em função das mudanças de disponibilidade de água para a evaporação. A evaporação potencial é igual a duas vezes a evaporação de lago para climas áridos, e diminui a medida que a umidade aumenta até atingir o valor da evaporação de lago.

O modelo se caracteriza por ser o único que avalia a evaporação em lagos usando apenas dados climatológicos medidos em terra, sem a necessidade da calibragem local dos coeficientes. O modelo é bastante útil quando se deseja produzir estimativas rápidas de evaporação.

As desvantagens do modelo proposto é que não são levados em conta os efeitos do vento sobre o lago, e os efeitos das zonas de transição entre os ambientes terrestre e do lago.

Maiores detalhes do modelo estão apresentados na seção 4.2.3.4 deste trabalho.

### 3.2.6 Avaliação da Evaporação através de Fórmulas Empíricas

A maioria das expressões empíricas para avaliação da evaporação são baseadas na lei de Dalton. Algumas delas já foram apresentadas na seção 3.2.3 deste trabalho.

As fórmulas empíricas são bastante utilizadas provavelmente devido a sua simplicidade e a possibilidade das

estimativas serem realizadas com dados normalmente disponíveis. É necessário saber que existem limitações, como por exemplo, o uso da temperatura do ar em substituição à temperatura da água, que pode introduzir grandes erros de estimativa. Outros fatores devem ser considerados além da temperatura, entre eles, as condições locais de umidade, a precipitação e o recobrimento vegetal.

A fórmula de Turc (SOLOMON e GUPTA, 1977) é uma expressão empírica de avaliação da evaporação de solos sem vegetação. Ela é bastante utilizada devido a sua simplicidade de uso, e por utilizar como parâmetros unicamente a temperatura média e a precipitação, sendo expressa por:

$$EV = \frac{P}{\left[ 0,9 + \frac{(120 P)^2}{L^2} \right]^{1/2}} \quad (3.22)$$

onde:

EV = evaporação média mensal (cm);

P = total mensal de precipitação (cm);

L = parâmetro heliotérmico (cm), dado por:

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3 \quad (3.23)$$

onde T é a temperatura média mensal (°C).

A expressão (3.22) para avaliação da evaporação mensal foi obtida por analogia à expressão apresentada por Solomon e Gupta para evaporação diária.

Apesar da fórmula de Turc ser bastante conhecida no mundo inteiro, os seus resultados devem ser usados com cuidado.

### 3.2.7 Medidas Diretas de Evaporação

Avaliar a evaporação através de medidas diretas consiste em medir os componentes do balanço hídrico em pequenos reservatórios de água. Essas medidas diretas são realizadas através de duas classes de instrumentos denominados atmômetros e evaporímetros. O termo atmômetro é utilizado para designar qualquer instrumento que apresente uma superfície porosa ao nível da qual se processa a evaporação. Os evaporímetros são reservatórios ou tanques de seção circular ou quadrada, onde a superfície da água se encontra, na maioria dos casos, livremente exposta ao processo de evaporação.

Entre os diversos tipos de atmômetros, o mais utilizado nas estações meteorológicas brasileiras, é o evaporímetro de Piché. O evaporímetro de Piché é um tubo de vidro graduado, onde a altura de água evaporada é lida diretamente, com uma extremidade fechada. Na extremidade aberta do tubo é ajustado um disco de papel poroso por onde se processa a evaporação. As dimensões do tubo, escala e diâmetro do disco de papel poroso variam dependendo do fabricante. Esse instrumento é instalado dentro do abrigo das estações meteorológicas, onde são

realizadas leituras diárias da evaporação. É um instrumento de baixo custo, e o uso de pequena quantidade de água facilita o serviço de operação e manutenção, permitindo a montagem de redes densas de observação. Porém, são frágeis e quebram com facilidade e suas medidas são questionáveis por estarem instalados no interior do abrigo meteorológico e por reproduzirem de forma inadequada a realidade física que governa a evaporação de superfície líquida.

Os evaporímetros utilizados pelos serviços meteorológicos mundiais são de diversos tipos. As diferenças fundamentais são referentes ao tamanho (superfície evaporante), à forma (superfície circular ou quadrada) e a maneira de instalação (sobre a superfície do solo ou enterrados).

O tanque classe A é o evaporímetro utilizado pelo serviço meteorológico dos Estados Unidos e também o mais difundido no Brasil. É um recipiente circular de 121,0 cm de diâmetro e 25,4 cm de profundidade, construído normalmente de chapa de ferro galvanizado. É montado sobre um estrado de madeira de modo que o fundo do tanque fique em torno de 5 a 10 cm acima do solo. O tanque contém água até uma distância de 5,0 cm da borda superior. A leitura do nível da água é realizada uma vez por dia, e a evaporação para o período de 24 horas é dada pela diferença de duas leituras consecutivas mais a precipitação (ou água adicionada) no período, se houver.

Os tanques classe A são de fácil instalação e custo de manutenção baixo se comparados aos tanques enterrados. A principal desvantagem destes tanques é a radiação nas paredes e fundo dos mesmos, resultando valores mais altos de evaporação.

As medidas de evaporação obtidas em tanques não podem ser consideradas diretamente como a evaporação de um lago devido a diferenças entre a temperatura da água no tanque e do lago, velocidade do vento e turbulência, tamanho da superfície evaporante, pressão do ar, influência da borda livre, cor do tanque, profundidade do lago, entre outros. Em geral, a evaporação observada é multiplicada por um coeficiente corretor, chamado de coeficiente de tanque, que varia com o local e com a época do ano. Estes coeficientes representam a proporcionalidade entre a evaporação de tanque e de lago. Como valor médio para correção da evaporação anual do tanque classe A é geralmente utilizado o valor 0,7, apesar deste valor variar bastante de uma região para outra (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1966; LINSLEY JR, KOHLER e PAULHUS, 1988). HOUNAM em 1973 (TROVATI, 1987) recomenda o uso do valor 0,7 para valores anuais de evaporação, não devendo ser usado para períodos menores que o ano. Entretanto, este coeficiente tem sido amplamente utilizado para dados mensais em vários países.

#### 3.2.7.1 Medidas Atmosféricas Diretas

Os métodos de avaliação da evaporação que utilizam grandezas meteorológicas usualmente medidas nas estações climatológicas, sejam eles empíricos ou com fundamento físico, são muitas vezes denominados de métodos hidrometeorológicos. Mais recentemente, começa a surgir um grupo de métodos baseados na teoria da camada limite atmosférica, que são denominados de

métodos micrometeorológicos. Na realidade a diferença entre os dois enfoques reside no fato de que os primeiros não consideram a natureza turbulenta dos fluxos de vapor e calor na atmosfera.

Com base na teoria de similaridade de Monin-Obukhov (BRUTSAERT, 1982) são desenvolvidos uma série de procedimentos experimentais para estimar a evaporação, que vão desde a medição direta dos fluxos turbulentos (medição de perfis médios, medição de covariâncias turbulentas, medição de variâncias turbulentas) até técnicas mais avançadas usando cintilômetros laser (medição dos índices de refração). Essas técnicas permitem que sejam medidos tanto grandezas médias como as respectivas flutuações turbulentas. Essas medidas permitem estimar os fluxos superficiais de vapor de água, calor ou quantidade de movimento.

A teoria de similaridade de Monin-Obukhov se aplica à região da camada limite atmosférica próximo à superfície, onde a turbulência transporta os fluxos superficiais por meio do campo de flutuações da velocidade. Estes fluxos são calculados por meio de correlações entre as flutuações de velocidade vertical e horizontal, temperatura e umidade específica. Considerando que nessa região os fluxos turbulentos não são muito diferentes do valor na superfície, a evaporação (ou fluxo turbulento de vapor) é dada por:

$$EV = \rho E [w'q'] \quad (3.24)$$

onde:

$EV$  = evaporação ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ );

$\rho$  = massa específica do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$w'$  = flutuação turbulenta da velocidade vertical ( $\text{m}/\text{s}$ );

$q'$  = flutuação turbulenta da umidade específica;

$E[ ]$  = valor esperado.

No Brasil, a avaliação da evaporação usando medidas diretas dos fluxos turbulentos na atmosfera, ainda se resume a poucos casos práticos. Maiores detalhes da metodologia de avaliação dos fluxos turbulentos fogem do escopo deste trabalho. O leitor interessado poderá consultar BRUTSAERT (1982) e TENNEKES e LUMLEY (1972).

## 4 AVALIAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Em áreas naturais cobertas por vegetação, como por exemplo uma bacia hidrográfica, é praticamente impossível avaliar separadamente a transpiração das plantas e a evaporação de superfícies com água ou dos poros do solo. O que se avalia na prática é a evapotranspiração, que representa a parcela de água transferida para a atmosfera proveniente da evaporação e da transpiração.

Este capítulo descreve de forma sucinta os fenômenos da transpiração e evapotranspiração, e as formas de avaliação tanto diretas (através de instrumentos) e indiretas (através de fórmulas) destes fenômenos.

### 4.1 TRANSPIRAÇÃO

A evaporação de um solo úmido como o de uma estrada, é um fenômeno regido apenas por leis físicas, e corresponde a designação usual de evaporação. Quando porém a evaporação se dá a partir de uma planta viva, o fenômeno não é apenas comandado por leis físicas, mas também biológicas. Neste caso recebe a denominação de transpiração.

A transpiração é um fenômeno característico dos seres vivos vegetais e animais. Contudo a parcela que cabe aos

animais é normalmente muito pequena e é comum desprezá-la no balanço hídrico, considerando apenas a transpiração dos vegetais.

A transpiração dos vegetais pode-se fazer através da epiderme, conhecida como transpiração cuticular, e através dos estômatos, conhecida como transpiração estomática. A transpiração pelas cutículas é pequena, representando cerca de 10% da transpiração total, exceto em vegetais que habitam lugares úmidos.

A transpiração é benéfica, pois transporta os nutrientes para a parte superior da planta e exerce uma ação refrescante, produzindo um abaixamento da temperatura do vegetal, contrabalançando o efeito dos raios solares. Porém, a transpiração excessiva pode ser prejudicial, secando o protoplasma das folhas fazendo com que estas murchem. Transpiração em excesso é comum durante a fase de crescimento dos vegetais, embora em alguns casos os sistemas de absorção e condução são relativamente insuficientes para suprir de água toda a demanda de transpiração, mesmo que o solo esteja úmido.

#### 4.1.1 Fatores que Influenciam a Transpiração

A transpiração é um fenômeno complexo que depende de vários fatores, sendo os mais importantes a diferença de pressão entre o vegetal e a atmosfera, a temperatura, a luminosidade, o vento e a umidade do solo (CHOW, 1964; ANTUNES JR e ANTUNES, 1967).

Apenas uma pequena quantidade da água retirada do solo pela planta é retida na sua estrutura. A água que chega às folhas através das raízes e do caule é transpirada através dos estômatos num processo governado pela diferença de pressão de vapor entre a região abaixo dos estômatos e a atmosfera. Esta diferença de pressão é a medida da energia necessária para mover a água da folha para o ar, sendo portanto o principal fator que afeta a transpiração.

A temperatura e a luminosidade, que são controlados pela radiação solar, são também fatores importantes na transpiração. Cerca de 70% da radiação incidente é absorvida pelas folhas. Deste total, 20% é usado no aquecimento do vegetal, 1% na fotossíntese, e os 49% restantes são usados na transpiração. A absorção da energia pela folha faz subir sua temperatura e a pressão de vapor aquosa, ocasionando o aumento de transpiração.

A remoção do vapor de água próximo à folha pela ação do vento, aumenta a transpiração. Isto se deve ao aumento da diferença de pressão de vapor entre a parte externa e interna da folha, originado pela substituição da camada úmida de ar por uma camada mais seca.

A transpiração é afetada pela umidade do solo quando esta é reduzida ao ponto de murchamento permanente. Entretanto, o efeito da variação da quantidade de umidade com a transpiração e com o crescimento das plantas, é ainda um problema sem solução definitiva. Alguns investigadores acreditam que a transpiração é independente da disponibilidade

de umidade até esta se reduzir ao ponto de murchamento; enquanto outros assumem que a transpiração é sempre proporcional à umidade remanescente no solo.

Além dos fatores físicos citados, a transpiração é também influenciada por fatores biológicos como: tipo de vegetação, tamanho e grau de abertura dos estômatos, sistema radicular, fase de crescimento e tipo de solo.

#### 4.1.2 Medida da Transpiração

A medida precisa da transpiração não pode ser facilmente obtida. Os valores obtidos servem apenas como referência para plantas em condições similares.

O método que tem a maior aceitação como medida prática da transpiração, é o que emprega o fitômetro fechado. O fitômetro consiste de um recipiente estanque contendo terra para alimentar as plantas. A tampa do fitômetro evita a entrada de água da chuva, só permitindo a perda por transpiração do vegetal. As perdas por transpiração, para um determinado instante de tempo, são determinadas pela diferença entre o peso inicial do conjunto mais a água adicionada e o peso final. Esse método só pode ser usado para plantas de pequeno porte, sendo difícil a extrapolação dos resultados para o caso de bacias hidrográficas. Outro aparelho usado é o potômetro, que consiste de um recipiente com água acoplado a um tubo e a uma régua graduada. Uma rolha atravessada por uma planta é usada para fechar o recipiente. A medida que a planta transpira o nível de

água se desloca no tubo, medindo-se o tempo gasto para o nível se deslocar do início ao final da régua. Conhecido o diâmetro do tubo, o comprimento da régua e o tempo, calcula-se a transpiração. Assim como o fitômetro, o potômetro só pode ser usado para avaliação da transpiração em vegetais de pequeno porte.

As taxas de evaporação não podem ser assumidas como indicadores das taxas de transpiração. Quando os estômatos estão abertos, a curva de transpiração tende a seguir a curva de evaporação até que ocorra um déficit de água e os estômatos comecem a se fechar. Com os estômatos quase fechados não existe relação aparente entre a taxa de transpiração e evaporação, sendo a transpiração controlada pelo diâmetro de abertura dos estômatos. Após o fechamento dos estômatos a transpiração continua em baixa intensidade pelas cutículas das plantas.

#### 4.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Conforme exposto nas seções anteriores, a evaporação direta do solo e da água acumulada sobre as plantas ocorre simultaneamente com a transpiração vegetal, não sendo fácil a separação destes dois processos. Assim, a soma dos dois processos, conhecida como evapotranspiração, é considerada como perda única.

#### 4.2.1 Fatores Determinantes da Evapotranspiração Potencial (ETP)

É comum considerar a evapotranspiração potencial função apenas das variáveis meteorológicas quando existe disponibilidade ilimitada de água no solo. Porém, a evapotranspiração depende também de outros fatores, entre eles o tipo de vegetação, havendo então a necessidade de calibração das fórmulas ou métodos empíricos de determinação da evapotranspiração potencial para as diferentes culturas.

Para TANNER (BERLATO e MOLION, 1981) podem existir pequenas diferenças na evapotranspiração potencial devido à estrutura da vegetação, mas para muitos tipos de vegetação, baixas ou altas, e cobrindo completamente o solo e sem deficiência de água, a evapotranspiração potencial é aproximadamente constante. Nesse caso a vegetação não exerce influência significativa sobre a evapotranspiração potencial, e podemos considerá-la função apenas das condições meteorológicas. Destas condições, a radiação solar é, sem dúvida, a mais importante. Seguem-lhe a velocidade do vento, a umidade e a temperatura do ar. De acordo com dados de MAKAMMAL e BRUCE em 1960 (BERLATO e MOLION, 1981), uma quantificação da importância relativa da radiação, velocidade do vento e umidade seria da ordem de 80:14:6, respectivamente.

Há entretanto outros autores (CHOW, 1964; LINSLEY, KOHLER e PAULHUS, 1988; LENCASTRE e FRANCO, 1984) que consideram a influência do tipo de vegetação muito importante, e usam explicitamente um coeficiente de cultura em suas

expressões, como nas fórmulas de Blaney-Criddle, Hedke, Blaney-Morin e outras. Os valores dos coeficientes de cultura variam bastante, assumindo valores, em geral, entre 0,40 e 1,20 (DAKER, 1960).

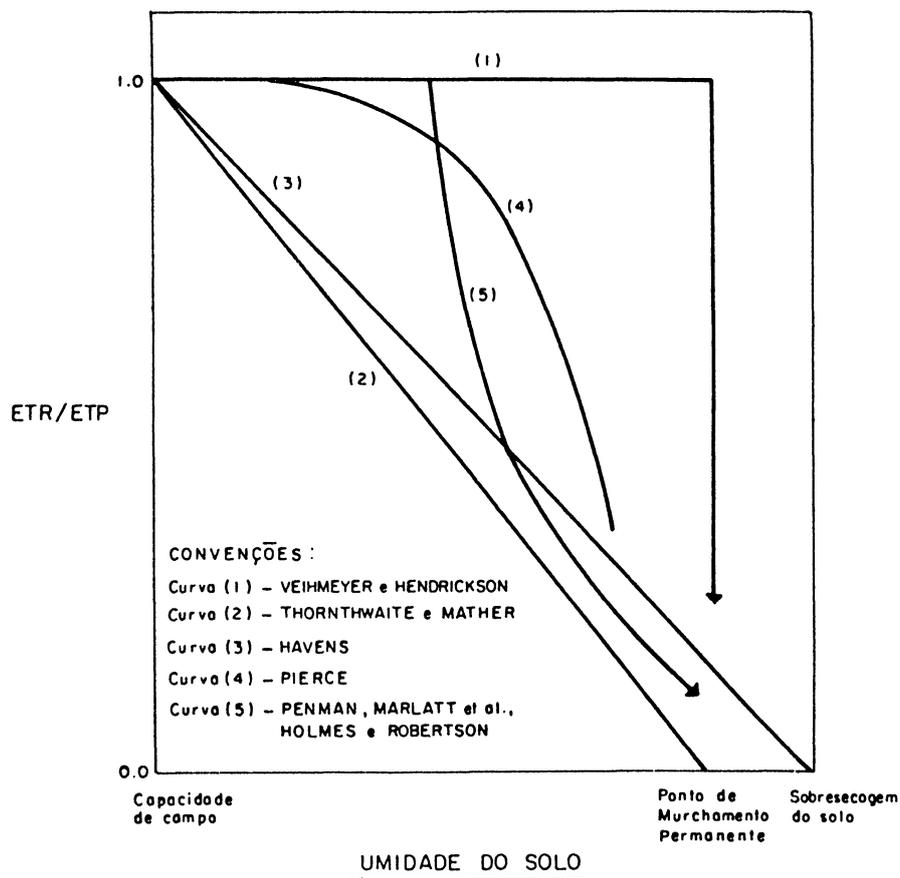
#### 4.2.2 Fatores Determinantes da Evapotranspiração Real (ETR)

Basicamente a evapotranspiração real depende dos mesmos fatores que regem a evapotranspiração potencial, incluindo-se a umidade do solo que desempenha o papel mais relevante. Sabe-se que a evapotranspiração real depende também de outros fatores, dos quais pode-se citar a textura do solo, a condutividade hidráulica do solo, a profundidade e desenvolvimento do sistema radicular, e a densidade da vegetação.

Em geral o estudo da evapotranspiração real se concentra mais na avaliação da umidade do solo. Sabe-se que à medida que a umidade do solo decresce, há um ponto em que a evapotranspiração real passa a ser menor que a evapotranspiração potencial. Várias teorias e métodos foram propostos para relacionar a disponibilidade de água no solo e a razão ETR/ETP. Na figura 4.1 são apresentadas cinco propostas que associam a variação da umidade do solo com a relação ETR/ETP. Segundo TANNER em 1967 (BERLATO e MOLION, 1981), estas 5 teorias são:

- 1) Veihmeyer e Hendrickson;
- 2) Thornthwaite e Mather;
- 3) Havens;
- 4) Pierce;
- 5) Penman, Marlatt et al., Holmes e Robertson.

FIGURA 4.1 - RELAÇÕES ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E UMIDADE DO SOLO



FONTE: BERLATO e MOLION, 1981

Estas teorias consideram que a água disponível para evapotranspiração se encontra dentro dos limites associados à capacidade de campo e ao ponto de murchamento permanente. A

capacidade de campo corresponde à quantidade de água retida no solo depois de drenado o excesso por ação da gravidade, e o ponto de murchamento permanente é atingido quando as plantas não conseguem mais retirar água do solo e começam a secar.

De acordo com a teoria de Veihmeyer e Hendrickson (curva 1), a evapotranspiração real se mantém a nível da evapotranspiração potencial ( $ETR/ETP = 1$ ) desde a capacidade de campo até o ponto de murchamento permanente. Thornthwaite e Mather, em uma conclusão inteiramente diferente, admitem uma variação linear entre o decréscimo da umidade do solo e o decréscimo da relação  $ETR/ETP$  (curva 2). Havens (curva 3), adota uma variação linear, como Thornthwaite e Mather, entretanto admite que a relação  $ETR/ETP$  é nula somente para pressões de sucção acima do ponto de murchamento permanente, que em geral é definido como 15 atm, sendo porém variável para cada tipo de cultura DAKER (1960). A curva 4 é uma concepção de Pierce, na qual a evapotranspiração se mantém ao nível da potencial por algum tempo depois que a quantidade de água no solo baixou da capacidade de campo, decrescendo em seguida rapidamente para zero. Para Penman, Marlatt et al., Holmes e Robertson, uma relação como a representada pela curva 5 parece ser a melhor aproximação. Sem dúvida, estes dados conflitantes não são devidos a erros experimentais, mas podem ser atribuídos às diferentes condições em que foram realizados os experimentos e às diferenças no conjunto de fatores que afetam o sistema solo-planta-atmosfera.

### 4.2.3 Avaliação da Evapotranspiração

#### 4.2.3.1 Avaliação da Evapotranspiração pelo Método Combinado ou Método de Penman

Na prática, a equação de Penman para determinar a evapotranspiração potencial é a mesma utilizada para a evaporação a partir de superfícies líquidas, com a ressalva que a radiação útil se refere à superfície com vegetação, ou seja, deve-se levar em conta o albedo próprio da cultura em questão. Outra alteração em relação ao caso das superfícies líquidas é adotar uma expressão mais adequada para o termo do balanço aerodinâmico (BERLATO e MOLION, 1981; FRERE, 1979).

A expressão de Penman para avaliação da evapotranspiração potencial é dada por:

$$ETP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} H + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (4.1)$$

onde:

ETP = evapotranspiração potencial (cm);

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor (mb/°C);

$\gamma$  = constante psicrométrica (mb/°C);

H = termo do balanço de energia (cm);

$E_a$  = termo do balanço aerodinâmico (cm).

Neste trabalho as fórmulas usadas para avaliar os termos H e  $E_a$  foram definidas por FRERE (1979).

A partir da expressão original desenvolvida por Penman apareceram muitas fórmulas derivadas. Entre essas podemos citar a equação de Penman-Monteith (ALLEN, 1986) dada por:

$$ETP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} H + \frac{\gamma^*}{\Delta + \gamma^*} E_a \quad (4.2)$$

com  $\gamma^* = \gamma ( 1 + r_s / r_a )$  (4.3)

onde:

ETP = evapotranspiração potencial (cm);

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor (mb/°C);

$\gamma$  = constante psicrométrica (mb/°C);

H = termo do balanço de energia (cm);

$E_a$  = termo do balanço aerodinâmico (cm);

$r_s$  = resistência de superfície (s/cm);

$r_a$  = resistência aerodinâmica (s/cm).

A resistência de superfície, também chamada de resistência estomática por alguns autores, representa a resistência encontrada pelo vegetal em extrair a água dos solos até a sua eliminação através dos estômatos. A resistência

aerodinâmica, combinação da resistência da camada limite e da resistência atmosférica, representa a oposição oferecida pelo vegetal à transferência da água do solo para a atmosfera.

A dificuldade em se avaliar corretamente as resistências aerodinâmica e de superfície tem restringido o uso do modelo. MATTOS (1991) aplicou o modelo à bacia do Jacaré-Guaçu no Estado de São Paulo e não obteve bons resultados, como mostra a tabela 2.22 do Capítulo 2 deste trabalho.

#### 4.2.3.2 Avaliação da Evapotranspiração pelo Balanço Hídrico

A expressão que avalia a evapotranspiração real através do balanço hídrico para uma bacia hidrográfica é semelhante à expressão usada no caso de avaliação da evaporação de superfícies líquidas. Consiste essencialmente na aplicação da equação da continuidade a uma dada bacia hidrográfica, como mostra a equação (4.4):

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (4.4)$$

onde:

S = armazenamento interno da bacia;

I(t) = fluxos de entrada na bacia;

Q(t) = fluxos de saída na bacia.

No caso de uma bacia hidrográfica,  $I(t)$  engloba a precipitação e a contribuição subterrânea de fora da bacia.  $Q(t)$  compreende a vazão defluente na exutória, as perdas por percolação profunda e a evapotranspiração.

A principal dificuldade no uso da equação (4.4) para avaliação da evapotranspiração real é a determinação precisa dos volumes de água armazenados nos solos e das perdas por percolação. Na prática usa-se uma forma simplificada do balanço hídrico onde a evapotranspiração é obtida diretamente da diferença entre a precipitação e o escoamento superficial, isto é, despreza-se a variação no armazenamento, a percolação profunda e as eventuais contribuições externas.

A consideração de armazenamento constante na bacia é bastante razoável quando o balanço se refere a períodos longos e as variáveis são médias de longo período. Neste caso, os fluxos de entrada e saída são acumulados por um longo período, e são, em geral, muito maiores que a variação no armazenamento. É sempre desejável que o período usado no balanço hídrico seja escolhido de tal forma que o início e o fim deste se dêem em condições semelhantes de armazenamento, isto é, em períodos de recessão com vazões aproximadamente iguais.

A expressão do balanço hídrico simplificado, como usado neste trabalho, é dada por:

$$\overline{ETR} = \overline{P} - \overline{Q} \quad (4.5)$$

onde:

$\overline{ETR}$  = evapotranspiração real anual média de longo período (cm/ano);

$\overline{P}$  = precipitação anual média na bacia (cm/ano);

$\overline{Q}$  = deflúvio anual médio (cm/ano).

Os volumes correspondentes a  $\overline{ETR}$ ,  $\overline{P}$  e  $\overline{Q}$  são divididos pela área da bacia e por isso são expressos em cm/ano.

A principal desvantagem do método do balanço hídrico é que não permite avaliar variações sazonais de evapotranspiração.

#### 4.2.3.3 Avaliação da Evapotranspiração pelo Método do Balanço de Energia

A equação do balanço de energia para determinação da evapotranspiração potencial é semelhante à equação (3.5) aplicada na determinação da evaporação, com algumas modificações.

A energia fornecida por advecção ( $Q_v$ ) pode ser em geral desprezada, embora existam casos especiais em que deve ser considerada, por exemplo, na vizinhança de zonas áridas onde existe energia aduzida pelos ventos quentes e secos. A variação de energia armazenada nas plantas  $\Delta Q$  pode também ser desprezada. Considerando estas simplificações a expressão do balanço de energia é dada por:

$$Q_n = Q_{et} + Q_h \quad (4.6)$$

onde:

- $Q_{et}$  = energia utilizada na evapotranspiração ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ );  
 $Q_n$  = radiação líquida ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ );  
 $Q_h$  = energia perdida para a atmosfera na forma de calor sensível ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ).

A evapotranspiração potencial pelo balanço de energia é então dada pela expressão:

$$ETP = \frac{Q_n}{\rho L (1+B)} = \frac{H}{1+B} \quad (4.7)$$

onde:

- ETP = evapotranspiração potencial (cm);  
 $Q_n$  = radiação líquida ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ );  
 $\rho$  = massa específica da água ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  
 $L$  = calor latente de evaporação ( $\cong 590 \text{ cal}/\text{g}$ );  
 $B$  = razão de Bowen;  
 $H$  = radiação útil (cm).

#### 4.2.3.4 Avaliação da Evapotranspiração pelo Modelo CRAE

O modelo CRAE ("Complementary Relationship Areal Evapotranspiration") desenvolvido por MORTON (1976, 1978, 1983a) é baseado no conceito da relação complementar entre evapotranspiração potencial e real, similar ao modelo CRLE

descrito na seção 3.2.5. Segundo este conceito, em superfícies inicialmente úmidas e que perdem água com o decorrer do tempo, a evapotranspiração real diminui enquanto a evapotranspiração potencial aumenta.

A relação complementar leva em conta as interações entre as superfícies evaporantes e o ar que circula sobre estas superfícies. Segundo esta relação, quando há diminuição na disponibilidade de água para a evapotranspiração real e conseqüentemente esta se reduz, o ar se torna mais quente e seco e a evapotranspiração potencial aumenta.

O modelo se caracteriza por fornecer estimativas rápidas da evapotranspiração, desconsiderando as complexidades do sistema solo-vegetação e sem exigir a calibragem local dos coeficientes.

A relação complementar conforme MORTON (1983a) é assim expressa:

$$ETR + ETP = 2ETS \quad (4.8)$$

onde:

ETR = evapotranspiração real;

ETP = evapotranspiração potencial;

ETS = evapotranspiração em condições de solo saturado.

A evapotranspiração potencial (ETP) é estimada a partir da solução das equações do balanço de energia e de massa, semelhante ao método de Penman. A diferença principal é o uso de um coeficiente chamado coeficiente de transferência de vapor

ao invés de usar a velocidade do vento no termo do balanço aerodinâmico. Este coeficiente é calibrado em função da pressão atmosférica, radiação útil e pressão de vapor.

A evapotranspiração em condições de solo saturado (ETS) é estimada a partir da equação de Priestley-Taylor ajustada para levar em conta os efeitos da advecção durante o inverno. A equação original de Priestley-Taylor para avaliação da evapotranspiração em superfícies saturadas sem advecção (ALLEN, 1986), é dada por:

$$ETS = 1,26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} H \quad (4.9)$$

onde:

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor de saturação à temperatura do ar (mb/°C);

$\gamma$  = constante psicrométrica (mb/°C);

H = termo do balanço de energia (ou radiação útil) para a temperatura do ar (cm).

A expressão (4.9) adaptada por MORTON (1979, 1983a) para levar em conta os efeitos da advecção, é assim expressa:

$$ETS = b_1 + b_2 \frac{\Delta'}{\Delta' + \gamma} H' \quad (4.10)$$

onde:

$b_1$  e  $b_2$  = constantes;

$\gamma$  = constante psicrométrica (mb/°C);

$\Delta'$  = declividade da curva de pressão de vapor de saturação à temperatura de equilíbrio (mb/°C);

$H'$  = termo do balanço de energia para a temperatura de equilíbrio (cm).

A temperatura de equilíbrio é definida como sendo a temperatura na qual as equações do balanço de energia e da transferência de massa fornecem o mesmo resultado. A energia de advecção representada por  $b_1$  é pequena nos meses de alta radiação, neste caso, a expressão (4.10) passa a ter novamente a forma da equação (4.9).

Assim sendo ETP e ETS são estimados a partir de observações climatológicas rotineiras e fornecem diretamente o valor da evapotranspiração real (ETR).

Da relação complementar, expressa pela equação (4.8), podemos concluir que se  $ETR = 0$ , não existe água disponível para evapotranspiração, neste caso o ar está bastante quente e seco e a evapotranspiração potencial (ETP) assume o seu valor máximo. À medida que o suprimento de água aumenta, a evapotranspiração real (ETR) cresce, causando um aumento na umidade do ar tornando-o mais frio e levando a um decréscimo na evapotranspiração potencial (ETP). Finalmente, quando o solo se torna saturado os valores de ETR e ETP convergem para ETS. Isto equivale a dizer, pela equação (4.8), que a evapotranspiração em condições saturadas (ETS) é igual à metade da evapotranspiração potencial (ETP) em condições de solo seco.

O modelo apresenta uma série de limitações (MORTON, 1978). As mais importantes estão relacionadas ao cálculo da evapotranspiração real, e são: i) os dados de umidade relativa devem ser precisos e medidos em estação climatológica que represente bem a área de interesse; ii) os cálculos não devem ser feitos para períodos inferiores a cinco dias; iii) o modelo não deverá ser usado para prever efeitos de alterações sobre o sistema solo-vegetação, uma vez que o modelo não usa dados destas superfícies; iv) não deve ser usado em regiões próximas a encostas e contornos de lagos.

#### 4.2.3.5 Avaliação da Evapotranspiração através de Fórmulas Empíricas

Existe na literatura um grande número de fórmulas empíricas para cálculo da evapotranspiração potencial. São descritas aqui apenas as expressões de Thornthwaite e Blaney-Criddle, por serem bastante utilizadas no Brasil, principalmente no dimensionamento de sistemas de irrigação, e a fórmula de Hargreaves por ter apresentado resultados muito bons para o Paraná, apesar de ser uma expressão bastante simples.

#### 4.2.3.5.1 Fórmula de Thornthwaite

O método empírico de estimativa da evapotranspiração potencial de uso mais generalizado no Brasil é o de Thornthwaite, que usa como dado de entrada apenas a temperatura do ar.

A expressão de Thornthwaite (RAUDKIVI, 1979), que expressa a evapotranspiração potencial como uma função exponencial da temperatura média mensal, é dada por:

$$ETP = 16,2 \left( \frac{10 T}{I} \right)^a \frac{ND N}{360} \quad (4.11)$$

onde:

ETP = evapotranspiração potencial mensal (mm);

T = temperatura média mensal (°C);

ND = número de dias do mês;

N = número de horas possíveis de insolação, função da latitude do local e da época do ano;

a = função cúbica de I, expressa por:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 0,0179 I + 0,492 \quad (4.12)$$

com I = índice anual de calor, definido como:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (4.13)$$

onde  $T_i$  é a temperatura média de cada mês do ano ( $^{\circ}\text{C}$ ).

A equação original de Thornthwaite foi definida a partir de dados de precipitação e escoamento de inúmeras bacias hidrográficas localizadas nas regiões central e leste dos Estados Unidos, onde predominam climas temperados e frios, devendo portanto ser usada com cautela em climas e locais diferentes, como é o caso do Brasil.

#### 4.2.3.5.2 Fórmula de Blaney-Criddle

A Fórmula de Blaney-Criddle (DAKER, 1960), desenvolvida a partir de estudos de evapotranspiração em culturas irrigadas no oeste dos Estados Unidos, é dada por:

$$\text{ETP} = K (8,12 + 0,457 T) I \quad (4.14)$$

onde:

ETP = evapotranspiração potencial mensal (mm);

K = coeficiente de evapotranspiração determinado para cada cultura;

T = temperatura média mensal ( $^{\circ}\text{C}$ );

I = percentagem mensal das horas de luz solar anual, função da latitude do local e da época do ano.

Essa fórmula empírica tem grande aceitação no mundo inteiro, porém os resultados obtidos em regiões fora do local onde ela foi definida devem ser usados com cuidado.

#### 4.2.3.5.3 Fórmula de Hargreaves

A fórmula de Hargreaves (HARGREAVES e SAMANI, 1982), função apenas da temperatura e da radiação solar, é dada por:

$$ETP = 0,0075 R_A \left( a + b \frac{n}{N} \right) (1,8 T + 32) ND \quad (4.15)$$

onde:

ETP = evapotranspiração potencial mensal (mm);

T = temperatura média mensal (°C);

$R_A$  = radiação solar recebida no limite da atmosfera  
(mm de água evaporada);

a, b = coeficientes em função da localização;

n = número de horas de insolação;

N = número de horas possíveis de insolação, função da latitude do local e da época do ano.

ND = número de dias do mês.

Segundo Hargreaves e Samani, a fórmula apesar de simples traz bons resultados podendo ser usada em qualquer parte do mundo sem receios. No presente estudo a fórmula de Hargreaves produziu resultados bastante coerentes.

#### 4.2.3.6 Avaliação da Evapotranspiração através de Medidas Diretas

Existem diferentes formas de se obter medidas diretas de evapotranspiração, entre as mais comuns temos os evapotranspirômetros e os lisímetros.

Os evapotranspirômetros são tanques enterrados cheios de solo e com vegetação, com dispositivo para medir a entrada da água e a água drenada ou percolada. Os evapotranspirômetros só são suficientemente precisos para períodos de tempo razoavelmente longos. Entretanto, quando considerada essa limitação e quando bem instalados e operados, esses instrumentos simples e baratos podem fornecer dados de evapotranspiração com precisão aceitável.

Os lisímetros são igualmente tanques cheios de solo e plantas, mas montados em um sistema de balança ou sobre um sistema hidráulico que permitem obter a verificação do peso em qualquer intervalo de tempo. Os lisímetros são, evidentemente, instrumentos mais precisos e permitem medidas da evapotranspiração para períodos de tempos menores. Entretanto, devido ao custo de instalação e cuidados de operação, esses instrumentos são indicados apenas para pesquisas e como padrão para calibragem de outros métodos de estimativa da evapotranspiração.

Para que estes equipamentos forneçam estimativas confiáveis da evapotranspiração, são necessários que se atendam algumas condições básicas relacionadas a instalação, manutenção, tamanho, preparo e tipo de solo. Entre eles: i) o

tamanho do tanque evapotranspirométrico deve ser suficientemente grande para minimizar o efeito da parede e não restringir o desenvolvimento radicular das plantas; ii) a estrutura do solo no tanque deve se aproximar tanto quanto possível da estrutura natural, ou seja, as camadas de solo devem ser colocadas na mesma ordem do perfil natural; iii) o solo dentro e fora do tanque devem ficar no mesmo nível. O preparo do solo dentro e fora deve ser realizado ao mesmo tempo e com a mesma intensidade; iv) a densidade de planta e o espaçamento dentro e fora do tanque devem ser iguais, bem como o regime de umidade do solo; v) os tanques devem ser construídos com material mau condutor de calor como fibra de vidro ou cimento-amianto.

Além dos evapotranspirômetros e lisímetros existem outras formas de se medir diretamente a evapotranspiração, entre eles podemos citar o tanque classe A e os métodos gravimétrico e da sonda de nêutrons.

A estimativa da evapotranspiração potencial, através do tanque classe A, é obtida multiplicando-se o valor da evaporação no tanque classe A por um fator de proporcionalidade denominado coeficiente de tanque, que depende do valor da velocidade do vento, umidade relativa e condições de exposição do tanque. Para o valor deste coeficiente, existem em VILLA NOVA e REICHARDT (1989) diversas recomendações.

Os métodos gravimétrico e da sonda de nêutrons se baseiam na medida gravimétrica das variações de umidade do solo. Os métodos assumem que as variações de umidade de um perfil de solo até uma certa profundidade são um reflexo apenas

das perdas de água por evapotranspiração. Portanto, os modelos exigem informações sobre a profundidade do sistema radicular, solo, variedade de planta, e do manejo do solo do ponto de vista físico, químico e de fertilidade (VILLA NOVA e REICHARDT, 1989). Se existirem outras perdas, tais como a percolação profunda de água abaixo da zona radicular, ou escoamento da água da chuva, estas precisam ser levadas em consideração.

Enquanto o método gravimétrico determina o teor de umidade por amostragem do solo, o método da sonda de nêutrons mede a umidade do solo diretamente através de uma sonda de nêutrons. Para isso, necessita da relação entre a contagem dos nêutrons e a umidade do solo para cada tipo de solo ou para cada horizonte, no caso do solo apresentar horizontes muito heterogêneos.

Outra forma de se medir diretamente a evapotranspiração é dada pela medida dos fluxos turbulentos verticais acima da vegetação. Esse método é essencialmente idêntico à medida da evaporação descrita na seção 3.2.7.1.

## 5 RESULTADOS

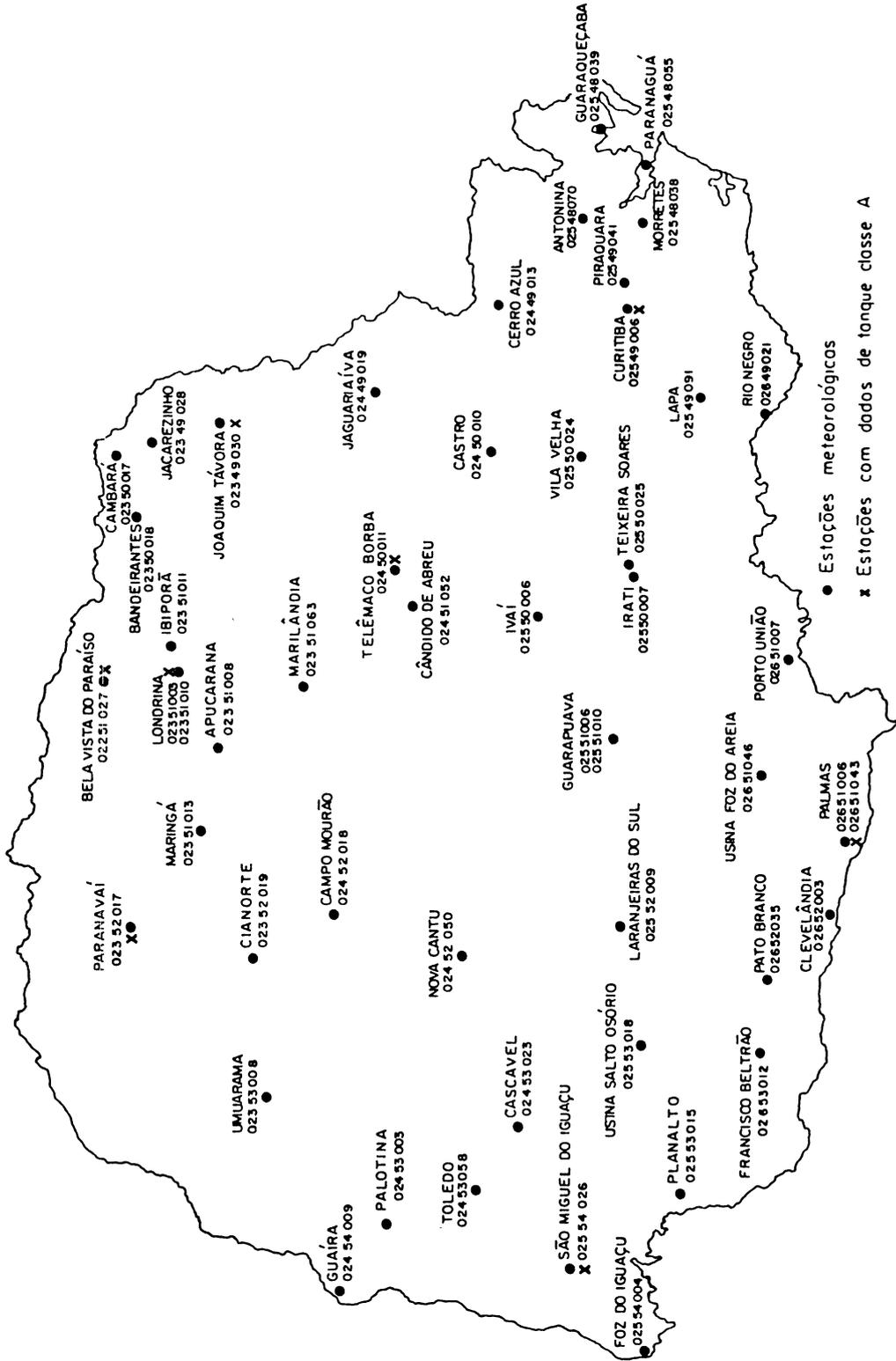
### 5.1 APLICAÇÃO DOS MODELOS AO ESTADO DO PARANÁ

Nos capítulos 3 e 4 foram apresentados diversos modelos de avaliação da evaporação e evapotranspiração. Este capítulo tem por objetivo mostrar os resultados obtidos ao se aplicar alguns dos modelos apresentados ao Estado do Paraná. Para isso foram utilizados dados meteorológicos, fluviométricos e pluviométricos de um grande número de estações cobrindo todo o Estado. As 51 estações meteorológicas usadas estão mostradas na figura 5.1. A tabela 5.1 apresenta o período de dados, a latitude, a longitude e a altitude destas estações.

Para cada uma das estações da tabela 5.1 foram obtidos os seguintes resultados:

- Evaporação potencial segundo Penman, conforme seção 3.2.4.
- Evaporação potencial e de lago segundo CRLE, conforme seção 3.2.5.
- Evaporação potencial segundo Turc, conforme seção 3.2.6.

FIGURA 5.1 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS



**TABELA 5.1- ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS**

CÓDIGO	NOME DA ESTAÇÃO	PERÍODO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
			(gg mm)	(gg mm)	(m)
02251027	Bela Vista do Paraíso	11/71 - 10/92	22 57	51 12	600
02349028	Jacarezinho	01/61 - 12/85	23 10	49 58	471
02349030	Joaquim Távora	10/71 - 10/92	23 30	49 52	512
02350017	Cambará	03/57 - 10/92	23 00	50 02	450
02350018	Bandeirantes	03/74 - 10/92	23 06	50 21	440
02351003	Londrina	01/76 - 10/92	23 18	51 09	585
02351008	Apucarana	01/65 - 10/92	23 30	51 32	746
02351010	Londrina	01/61 - 12/85	23 19	51 09	566
02351011	Ibiporã	11/71 - 10/92	23 16	51 01	484
02351013	Maringá	01/61 - 08/89	23 25	51 57	542
02351063	Marilândia	08/78 - 03/92	23 54	51 13	1020
02352017	Paranavaí	06/74 - 10/92	23 05	52 26	480
02352019	Cianorte	10/71 - 10/92	23 40	52 35	530
02353008	Umuarama	11/71 - 09/92	23 44	53 17	480
02449013	Cerro Azul	04/72 - 10/92	24 49	49 15	443
02449019	Jaguariaíva	01/61 - 07/81	24 14	49 42	923
02450010	Castro	01/61 - 08/89	24 47	50 00	1009
02450011	Telêmaco Borba	12/71 - 09/92	24 20	50 37	768
02451052	Cândido de Abreu	07/88 - 10/92	24 25	50 48	600
02452018	Campo Mourão	01/61 - 01/86	24 03	52 22	616
02452050	Nova Cantu	02/76 - 10/92	24 40	52 34	540
02453003	Palotina	09/72 - 10/92	24 18	53 55	310
02453023	Cascavel	10/72 - 10/92	24 56	53 26	760
02453058	Toledo	08/75 - 12/85	24 44	53 45	500
02454009	Guaíra	02/63 - 12/86	24 05	54 15	231
02548038	Morretes	01/66 - 10/92	25 30	48 49	59
02548039	Guaraqueçaba	11/77 - 10/92	25 18	48 20	40
02548055	Paranaguá	01/61 - 12/85	25 31	48 31	5
02548070	Antonina	11/77 - 10/92	25 13	48 48	60
02549006	Curitiba	03/51 - 08/89	25 26	49 16	929
02549041	Piraquara	02/70 - 10/92	25 25	49 08	930
02549091	Lapa	09/88 - 10/92	21 47	49 43	907
02550006	Ivaí	01/61 - 08/89	25 01	50 51	808
02550007	Irati	09/66 - 12/85	25 28	50 38	837
02550024	Vila Velha	01/54 - 10/92	25 13	50 01	880
02550025	Teixeira Soares	01/63 - 09/92	25 27	50 35	893
02551006	Guarapuava	01/51 - 05/92	25 24	51 28	1036
02551010	Guarapuava	07/73 - 10/92	25 21	51 30	1020
02552009	Laranjeiras do Sul	10/73 - 10/92	25 25	52 25	880
02553015	Planalto	03/73 - 09/92	25 42	53 46	400
02553018	Usina Salto Osório	07/72 - 09/92	25 31	53 01	514
02554004	Foz do Iguaçu	01/51 - 04/81	25 33	54 34	161
02554026	São Miguel do Iguaçu	08/82 - 10/92	25 11	54 08	307
02649021	Rio Negro	01/61 - 05/81	26 06	49 48	824
02651006	Palmas	01/61 - 04/85	26 29	51 59	1091
02651007	Porto União	01/61 - 12/78	26 13	51 04	778
02651043	Palmas	01/79 - 10/92	26 29	51 59	1100
02651046	Usina Foz do Areia	05/81 - 05/93	26 05	51 39	600
02652003	Clevelândia	12/72 - 10/92	26 25	52 21	930
02652035	Pato Branco	01/79 - 10/92	26 07	52 41	700
02653012	Francisco Beltrão	05/73 - 10/92	26 05	53 03	650

- Evapotranspiração potencial segundo Penman, conforme seção 4.2.3.1.
- Evapotranspiração potencial segundo Thornthwaite, conforme seção 4.2.3.5.1.
- Evapotranspiração potencial segundo Blaney-Criddle, conforme seção 4.2.3.5.2.
- Evapotranspiração potencial segundo Hargreaves, conforme seção 4.2.3.5.3.
- Evapotranspiração potencial e real segundo CRAE, conforme seção 4.2.3.4.

Os resultados foram obtidos a partir de dados meteorológicos diários. As tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os resultados de evaporação e evapotranspiração a nível de totais anuais médios e no Apêndice 1 são mostrados os resultados médios mensais para cada um dos locais estudados.

TABELA 5.2 - TOTAIS ANUAIS MÉDIOS DE EVAPORAÇÃO (mm)

CÓDIGO	NOME DA ESTAÇÃO	PERÍODO	EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
			PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
02251027	Bela Vista do Paraíso	11/71 - 10/92	1588	1879	847	1468
02349028	Jacarezinho	01/61 - 12/85	1508	1814	852	1482
02349030	Joaquim Távora	10/71 - 10/92	1682	1796	850	1443
02350017	Cambará	03/57 - 10/92	1497	1619	821	1299
02350018	Bandeirantes	03/74 - 10/92	1789	1925	870	1505
02351003	Londrina	01/76 - 10/92	1652	1866	873	1485
02351008	Apucarana	01/65 - 10/92	1768	1590	886	1216
02351010	Londrina	01/61 - 12/85	1515	1827	883	1462
02351011	Ibiporã	11/71 - 10/92	1716	1958	904	1506
02351013	Maringá	01/61 - 08/89	1547	1928	916	1491
02351063	Marilândia	08/78 - 10/92	1731	1680	842	1378
02352017	Paranaíba	06/74 - 10/92	1754	1995	892	1550
02352019	Cianorte	10/71 - 10/92	1680	1909	919	1481
02353008	Umuarama	11/71 - 10/92	1680	2008	945	1524
02449013	Cerro Azul	04/72 - 10/92	1351	1435	830	1255
02449019	Jaguariaíva	01/61 - 07/81	1298	1352	761	1272
02450010	Castro	01/61 - 08/89	1172	1241	767	1161
02450011	Telêmaco Borba	12/71 - 09/92	1365	1487	811	1314
02451052	Cândido de Abreu	07/88 - 10/92	1463	1660	858	1413
02452018	Campo Mourão	01/61 - 01/86	1491	1687	868	1397
02452050	Nova Cantu	02/76 - 10/92	1566	1837	983	1452
02453003	Palotina	09/72 - 10/92	1658	1747	926	1488
02453023	Cascavel	10/72 - 10/92	1604	1715	912	1388
02453058	Toledo	08/75 - 12/85	1490	1738	906	1398
02454009	Guaíra	02/63 - 12/86	1499	1689	907	1443
02548038	Morretes	01/66 - 10/92	1205	1272	979	1195
02548039	Guaraqueçaba	11/77 - 10/92	1242	1261	1048	1210
02548055	Paranaguá	01/61 - 12/85	1190	1262	976	1174
02548070	Antonina	11/77 - 10/92	1237	1252	1059	1197
02549006	Curitiba	03/51 - 08/89	1214	1282	738	1169
02549041	Piraquara	02/70 - 10/92	1217	1174	717	1119
02549091	Lapa	09/88 - 10/92	1243	1288	755	1189
02550006	Ivaí	01/61 - 08/89	1238	1375	768	1202
02550007	Irati	09/66 - 12/85	1212	1357	762	1160
02550024	Vila Velha	01/54 - 10/92	1335	1438	764	1220
02550025	Teixeira Soares	01/63 - 09/92	1265	1311	768	1181
02551006	Guarapuava	01/51 - 05/92	1261	1400	814	1221
02551010	Guarapuava	07/73 - 10/92	1334	1441	804	1272
02552009	Laranjeiras do Sul	10/73 - 10/92	1490	1654	880	1331
02553015	Planalto	03/73 - 09/92	1655	1936	976	1479
02553018	Usina Salto Osório	07/72 - 09/92	1497	1623	957	1307
02554004	Foz do Iguaçu	01/51 - 04/81	1424	1601	982	1409
02554026	São Miguel do Iguaçu	08/82 - 10/92	1644	1793	955	1485
02649021	Rio Negro	01/61 - 05/81	1174	1267	740	1147
02651006	Palmas	01/61 - 04/85	1146	1234	712	1147
02651007	Porto União	01/61 - 12/78	1156	1279	800	1120
02651043	Palmas	01/79 - 10/92	1194	1132	798	958
02651046	Usina Foz do Areia	05/81 - 05/93	1224	1357	859	1170
02652003	Clevelândia	12/72 - 10/92	1461	1484	829	1259
02652035	Pato Branco	01/79 - 10/92	1555	1683	886	1377
02653012	Francisco Beltrão	05/73 - 10/92	1477	1664	902	1360

**TABELA 5.3 - TOTAIS ANUAIS MÉDIOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO (mm)**

CÓDIGO	NOME DA ESTAÇÃO	PERÍODO	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL					EVAPOT. REAL CRAE
			PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	
02251027	Bela Vista do Paraíso	11/71 - 10/92	1299	1036	1260	1511	1843	988
02349028	Jacarezinho	01/61 - 12/85	1164	1063	1269	1519	1765	1095
02349030	Joaquim Távora	10/71 - 10/92	1392	1022	1253	1477	1756	1032
02350017	Cambará	03/57 - 10/92	1187	1037	1253	1362	1583	929
02350018	Bandeirantes	03/74 - 10/92	1495	1088	1281	1544	1892	1015
02351003	Londrina	01/76 - 10/92	1336	1011	1252	1524	1824	1039
02351008	Apucarana	01/65 - 10/92	1509	975	1236	1271	1564	791
02351010	Londrina	01/61 - 12/85	1173	1006	1253	1502	1787	1037
02351011	Ibiporã	11/71 - 10/92	1423	1082	1278	1548	1925	984
02351013	Maringá	01/61 - 08/89	1204	1086	1279	1531	1891	991
02351063	Maniândia	08/78 - 10/92	1449	867	1178	1397	1635	1017
02352017	Paranavaí	06/74 - 10/92	1449	1109	1289	1592	1956	1039
02352019	Cianorte	10/71 - 10/92	1394	1065	1272	1521	1872	991
02353008	Umuarama	11/71 - 10/92	1388	1093	1280	1567	1973	969
02449013	Cerro Azul	04/72 - 10/92	1105	984	1231	1228	1394	1048
02449019	Jaguariaíva	01/61 - 07/81	976	838	1152	1295	1285	1134
02450010	Castro	01/61 - 08/89	894	792	1119	1141	1190	1042
02450011	Telêmaco Borba	12/71 - 09/92	1053	871	1172	1324	1433	1100
02451052	Cândido de Abreu	07/88 - 10/92	1133	934	1207	1446	1605	1111
02452018	Campo Mourão	01/61 - 01/86	1162	979	1234	1428	1640	1057
02452050	Nova Cantu	02/76 - 10/92	1277	1035	1259	1489	1796	1006
02453003	Palotina	09/72 - 10/92	1352	1064	1266	1520	1691	1178
02453023	Cascavel	10/72 - 10/92	1318	926	1207	1419	1672	1005
02453058	Toledo	08/75 - 12/85	1166	1005	1241	1424	1697	993
02454009	Guaira	02/63 - 12/86	1180	1089	1275	1477	1654	1156
02548038	Morretes	01/66 - 10/92	962	1001	1241	1151	1225	1083

**TABELA 5.3 - TOTAIS ANUAIS MÉDIOS DE EVAOTRANSPIRAÇÃO (mm) (cont.)**

CÓDIGO	NOME DA ESTAÇÃO	PERÍODO	EVAOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAOT. REAL		
			PENMAN	THORNT	BLANEY		HARGRE	CRAE
02548039	Guaraqueçaba	11/77 - 10/92	1006	1020	1249	1151	1209	1136
02548055	Paranaguá	01/61 - 12/85	937	1036	1263	1191	1260	1124
02548070	Antonina	11/77 - 10/92	1003	1003	1243	1150	1200	1120
02549006	Curitiba	03/51 - 08/89	932	798	1120	1162	1232	1017
02549041	Piraquara	02/70 - 10/92	953	783	1107	1118	1115	1016
02549091	Lapa	09/88 - 10/92	959	807	1122	1180	1232	1053
02550006	Ivaí	01/61 - 08/89	954	839	1153	1209	1331	993
02550007	Irati	09/66 - 12/85	938	809	1129	1160	1318	920
02550024	Vila Velha	01/54 - 10/92	1036	835	1151	1233	1394	955
02550025	Teixeira Soares	01/63 - 09/92	1007	813	1131	1172	1260	1020
02551006	Guarapuava	01/51 - 05/92	968	801	1122	1228	1349	998
02551010	Guarapuava	07/73 - 10/92	1024	808	1124	1273	1386	1059
02552009	Laranjeiras do Sul	10/73 - 10/92	1213	888	1186	1360	1611	950
02553015	Planalto	03/73 - 09/92	1374	1074	1269	1516	1900	960
02553018	Usina Salto Osório	07/72 - 09/92	1236	986	1234	1357	1584	944
02554004	Foz do Iguaçu	01/51 - 04/81	1099	1047	1257	1429	1541	1180
02554026	São Miguel do Iguaçu	08/82 - 10/92	1362	1082	1271	1510	1746	1123
02649021	Rio Negro	01/61 - 05/81	903	809	1118	1131	1219	993
02651006	Palmas	01/61 - 04/85	859	751	1074	1135	1181	1014
02651007	Porto União	01/61 - 12/78	896	830	1140	1106	1241	929
02651043	Palmas	01/79 - 10/92	999	780	1103	1021	1106	746
02651046	Usina Foz do Areia	05/81 - 05/93	950	854	1163	1166	1317	951
02652003	Clevelândia	12/72 - 10/92	1188	816	1135	1283	1437	981
02652035	Pato Branco	01/79 - 10/92	1263	890	1186	1405	1638	1012
02653012	Francisco Beltrão	05/73 - 10/92	1190	922	1198	1394	1623	999

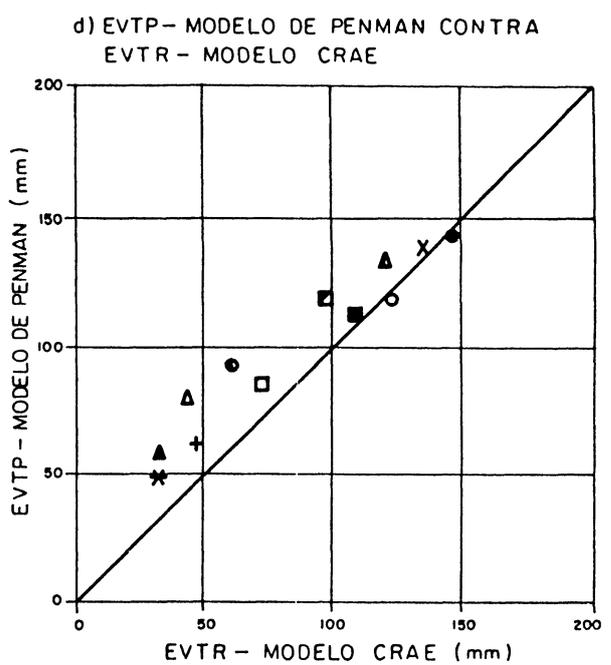
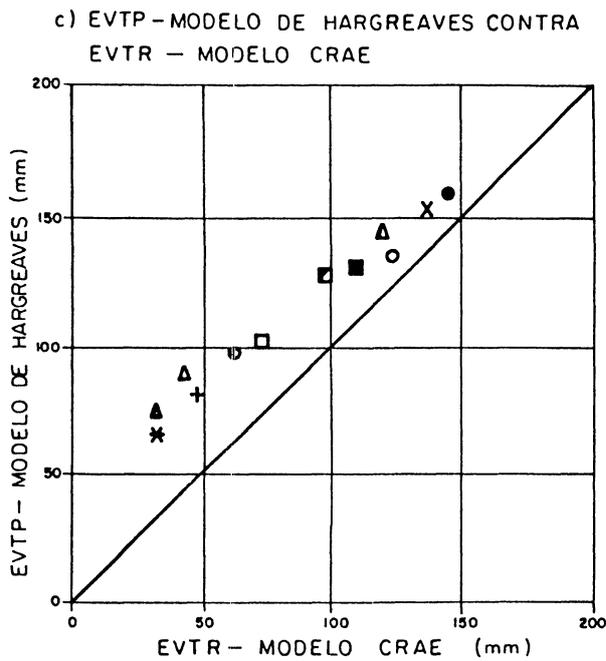
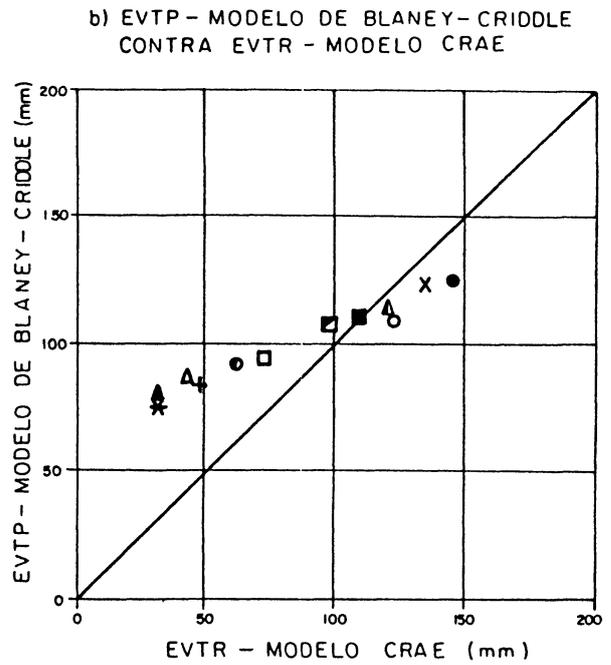
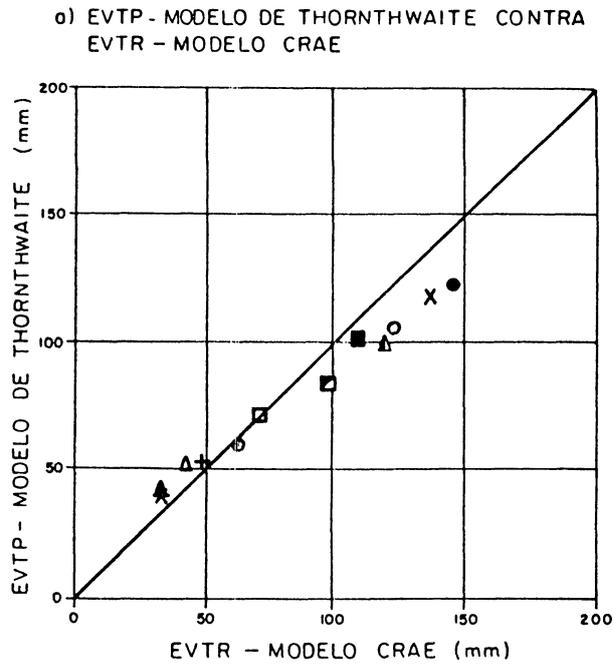
## 5.2 RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (MODELO CRAE) COMPARADOS AOS RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

Um grande número de resultados foram obtidos por diferentes modelos. A dificuldade é decidir qual modelo a ser adotado ou recomendado como o "melhor". Não existem testes estatísticos que respondam a esta questão, uma vez que não sabemos qual modelo deve ser considerado como "modelo verdade". Este modelo é muitas vezes escolhido em função de critérios de julgamento do usuário ou dos dados disponíveis para proceder o cálculo.

Se acreditarmos, por exemplo, que a evapotranspiração real gerada pelo modelo CRAE é razoável, e plotarmos estes valores nas abcissas e as evapotranspirações potenciais obtidas pelos modelos empíricos e de Penman nas ordenadas, espera-se que nenhum ponto se situe abaixo da reta de  $45^{\circ}$ . A figura 5.2 mostra os resultados obtidos.

A figura 5.2 mostra que os modelos empíricos devem ser usados com cuidado. Nota-se que os problemas acontecem principalmente nos meses quentes, isto se justifica, em parte, porque os modelos empíricos mais usados foram definidos para os Estados Unidos, onde as latitudes são maiores e predominam temperaturas médias menores nos meses quentes, comparativamente às do Brasil. Segundo esta figura os resultados mais confiáveis são os obtidos pelos modelos de Penman e Hargreaves. As fórmulas de Blaney-Criddle e Thornthwaite apresentaram resultados inconsistentes com a evapotranspiração real estimada pelo modelo CRAE.

FIGURA 5.2 - RELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (EVTP) E EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL (EVTR)



CONVENÇÕES :

- |               |            |              |
|---------------|------------|--------------|
| ● - Janeiro   | + - Maio   | ● - Setembro |
| ○ - Fevereiro | * - Junho  | ■ - Outubro  |
| ■ - Março     | ▲ - Julho  | ▲ - Novembro |
| □ - Abril     | Δ - Agosto | X - Dezembro |

### 5.3 ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO

As figuras 5.3 a 5.17 mostram a distribuição dos resultados de evapotranspiração e evaporação para o Estado do Paraná através de isolinhas médias. Para o traçado das isolinhas foi utilizado a metodologia descrita por KAVISKI e KRÜGER (1993), que consiste no ajuste de uma superfície multiquadrática aos dados das 51 estações da tabela 5.1.

Foram traçadas as isolinhas de evapotranspiração potencial de Penman, evapotranspiração potencial CRAE, evapotranspiração real CRAE, evaporação potencial de Penman e evaporação de superfície líquida CRLE. Em cada caso foram traçadas as isolinhas dos totais anuais médios, e dos totais médios dos meses de janeiro e julho. Foram escolhidos os meses de janeiro e julho para se ter idéia da variação destas grandezas dentro do ano, considerando um mês quente e um mês frio.

Analisando os mapas de isolinhas verifica-se, com exceção da região litorânea, que para evaporação e evapotranspiração, o crescimento dos totais anuais e mensais ocorre no sentido sudeste para noroeste. Apenas para as isolinhas de evapotranspiração real média mensal de julho (modelo CRAE), observa-se um mínimo no centro do Estado e a partir daí o crescimento se dá para nordeste e oeste.

FIGURA 5.3 - ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL - TOTAL ANUAL MÉDIO - MODELO DE PENMAN ( mm )

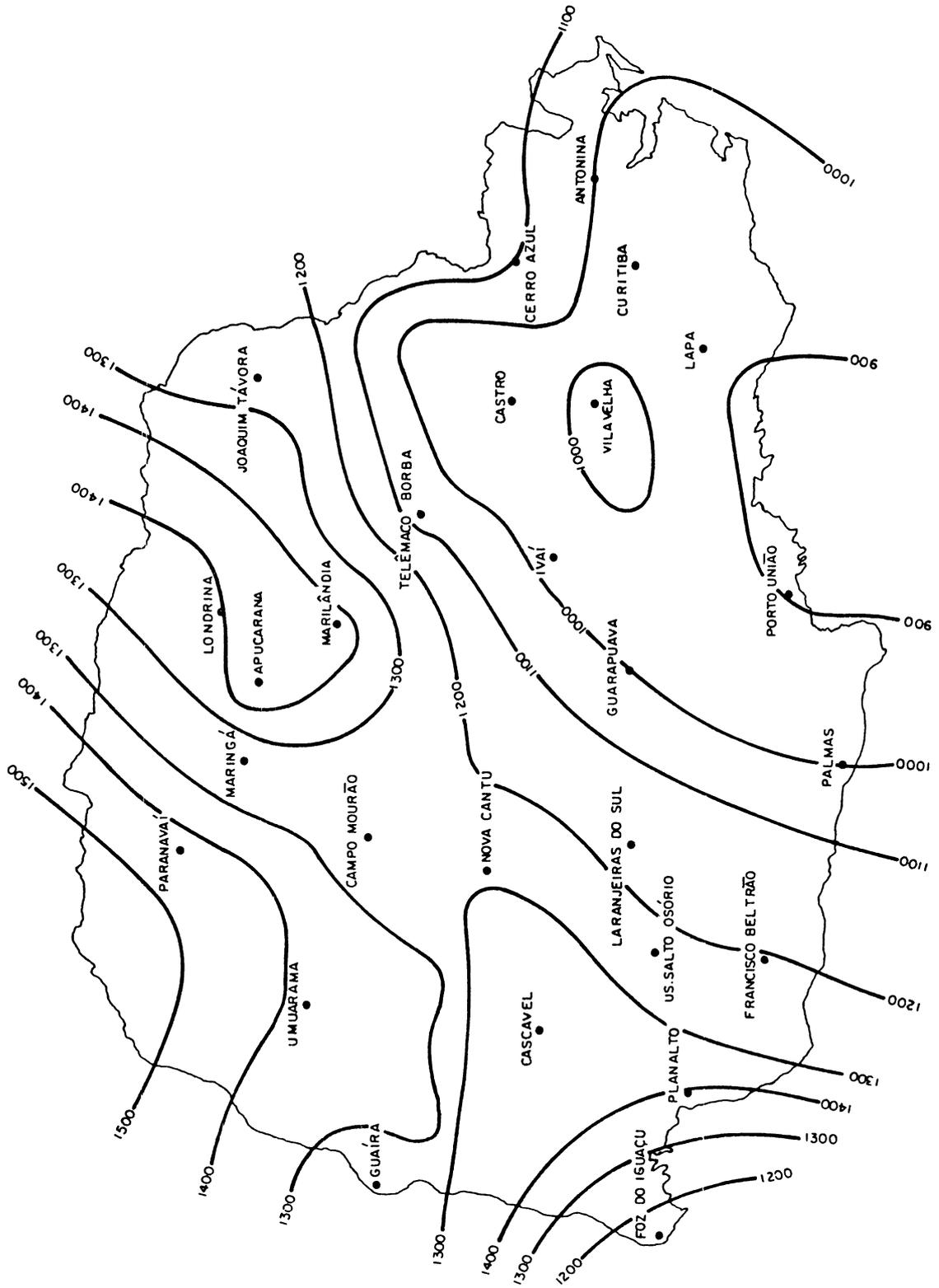


FIGURA 5.4 - ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO - MODELO DE PENMAN (mm)

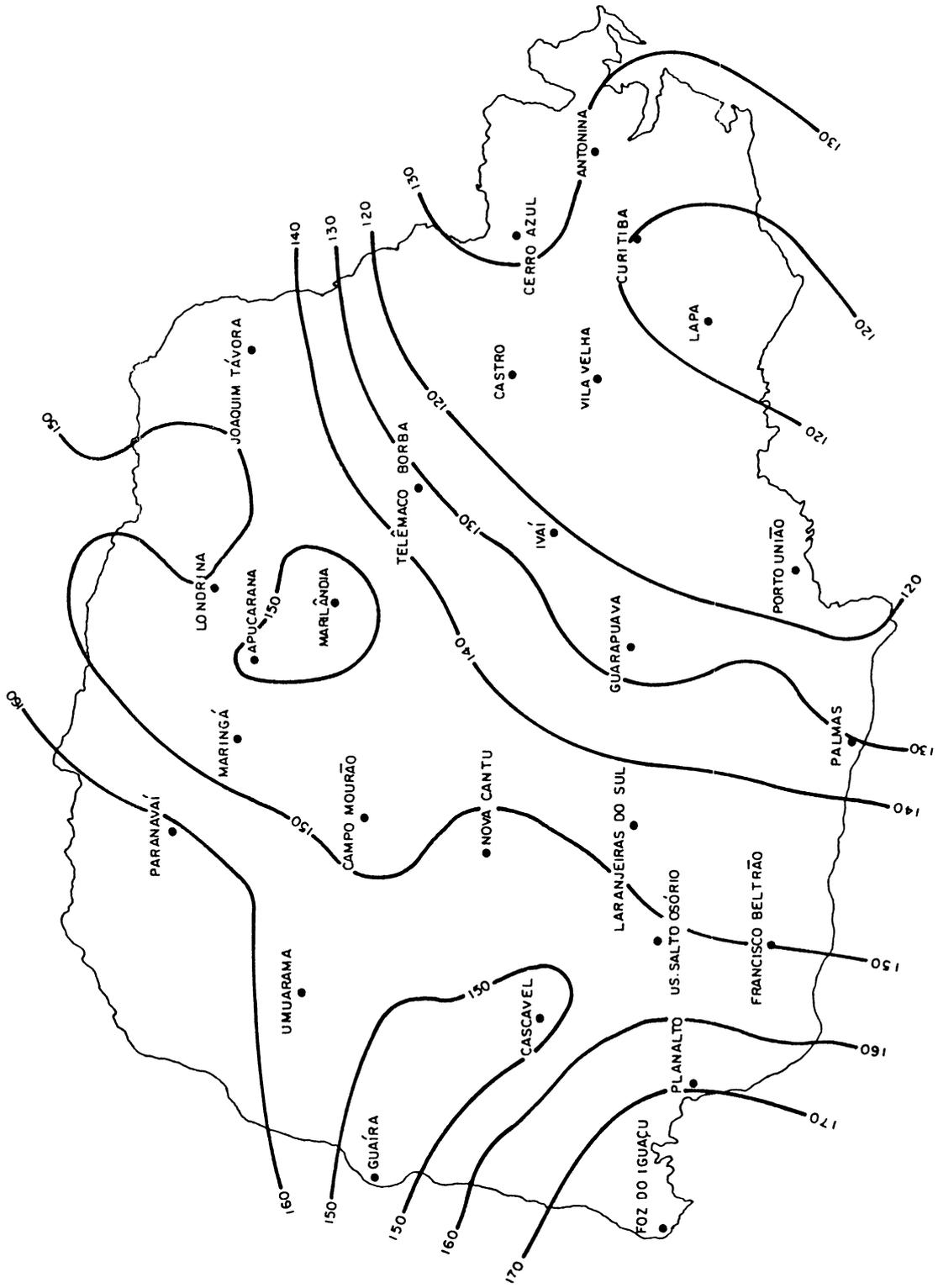


FIGURA 5.5 – ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL – TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO – MODELO DE PENMAN (mm)

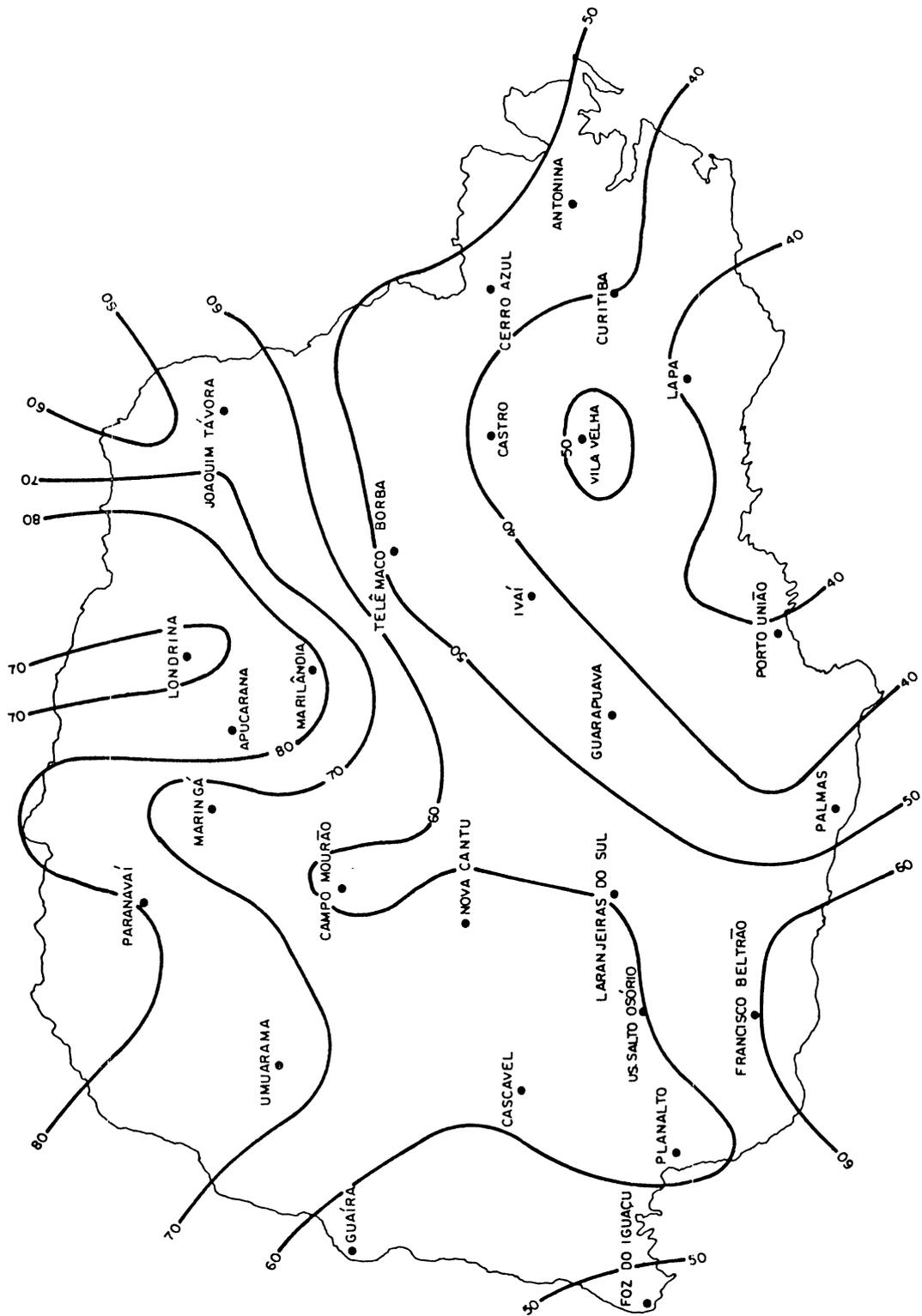


FIGURA 5.6 - ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL - TOTAL ANUAL MÉDIO - MODELO CRAE (mm)

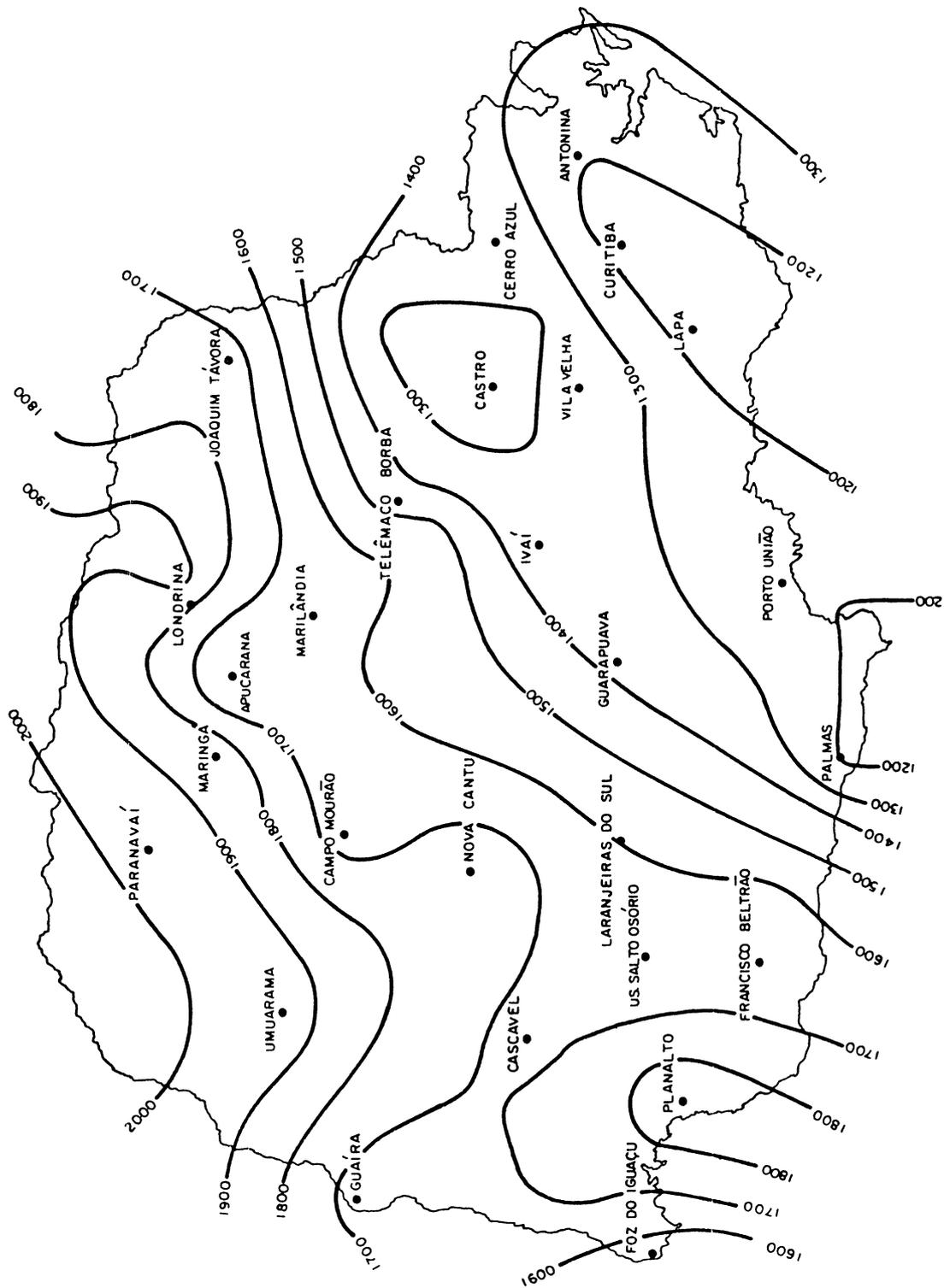


FIGURA 5.7 - ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO - MODELO CRAE ( mm )

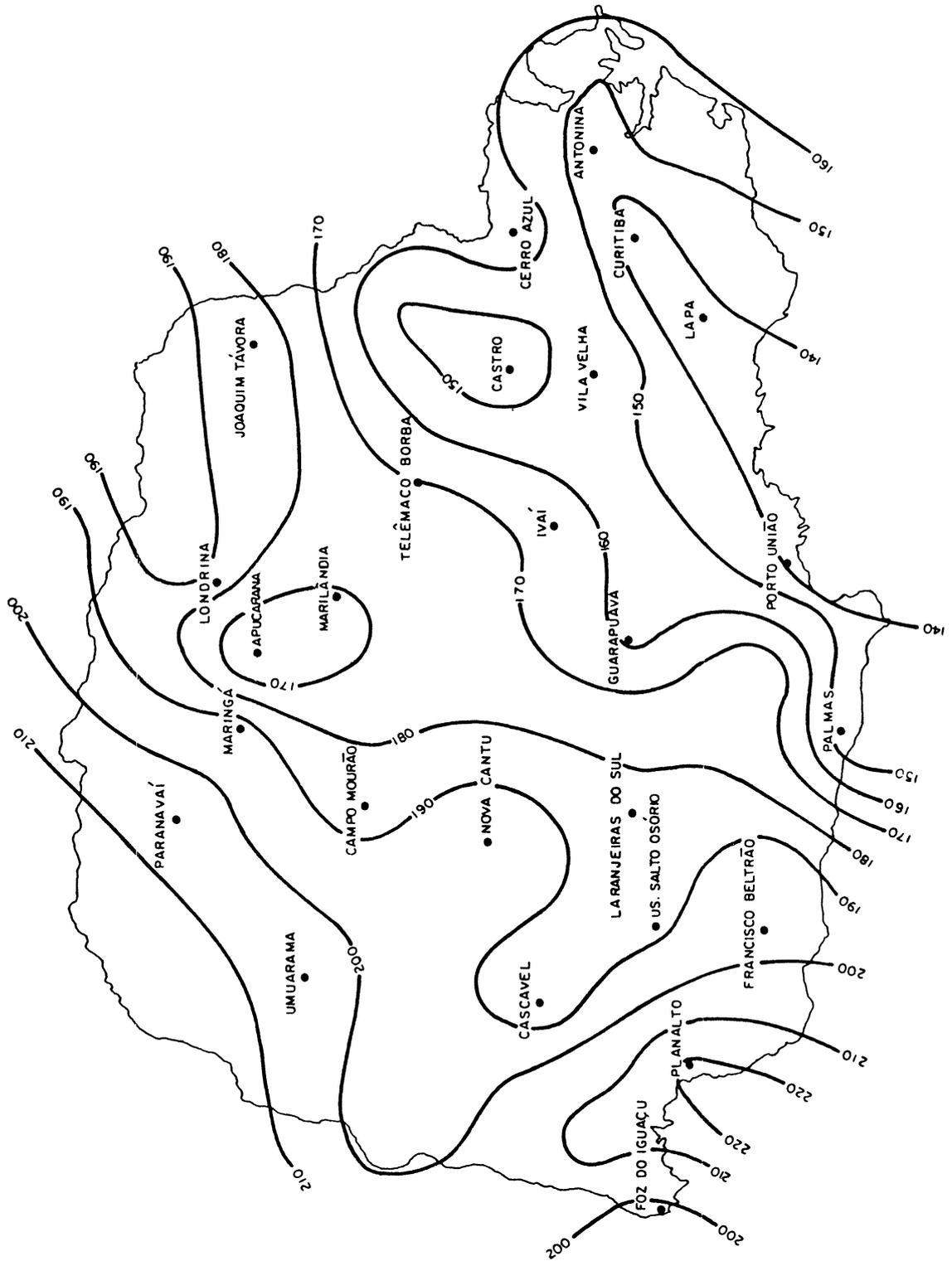


FIGURA 5.8 - ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO - MODELO CRAE (mm)

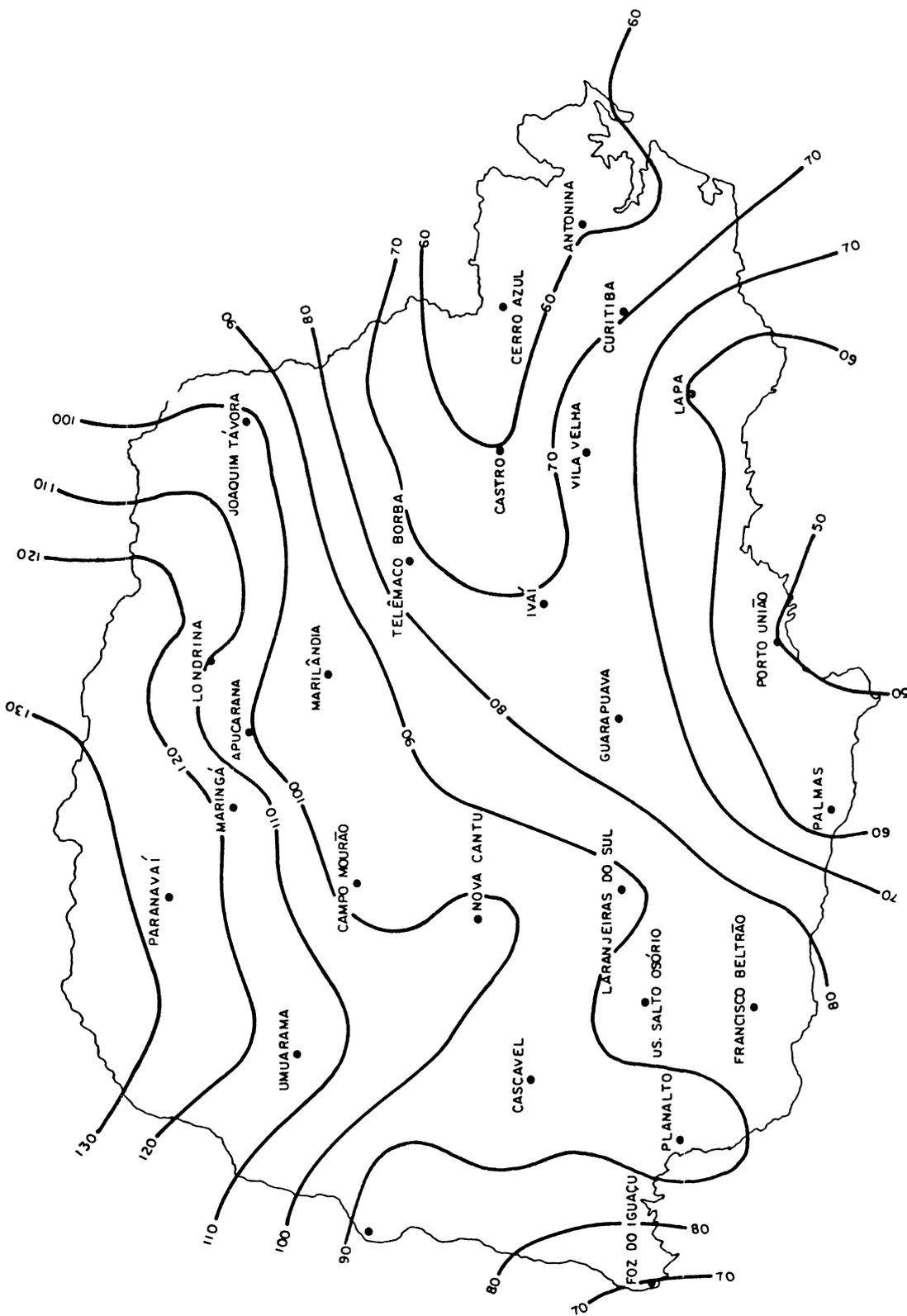


FIGURA 5.9 - ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL - TOTAL ANUAL MÉDIO - MODELO CRAE ( mm )

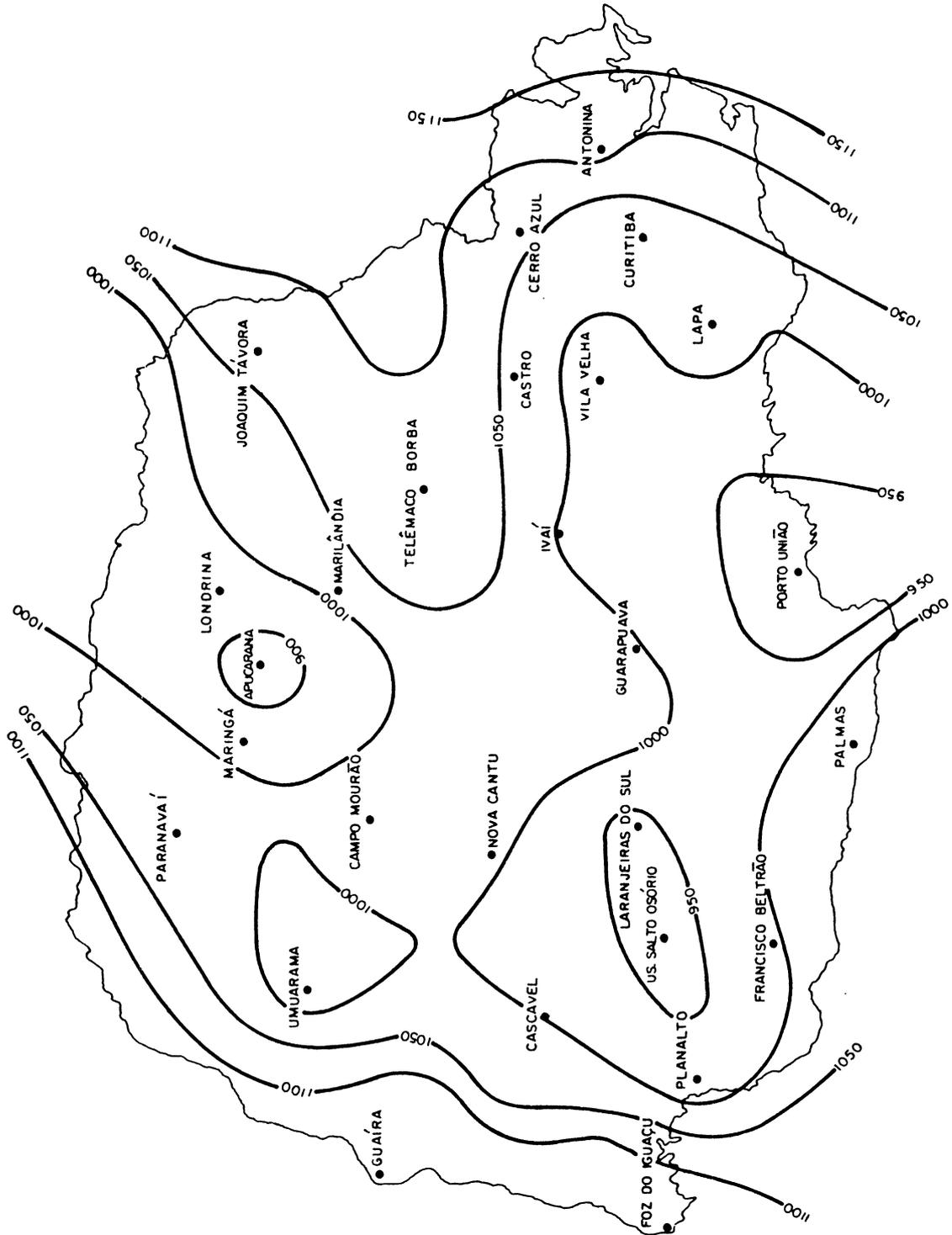


FIGURA 5.10 — ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL — TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO — MODELO CRAE (mm)

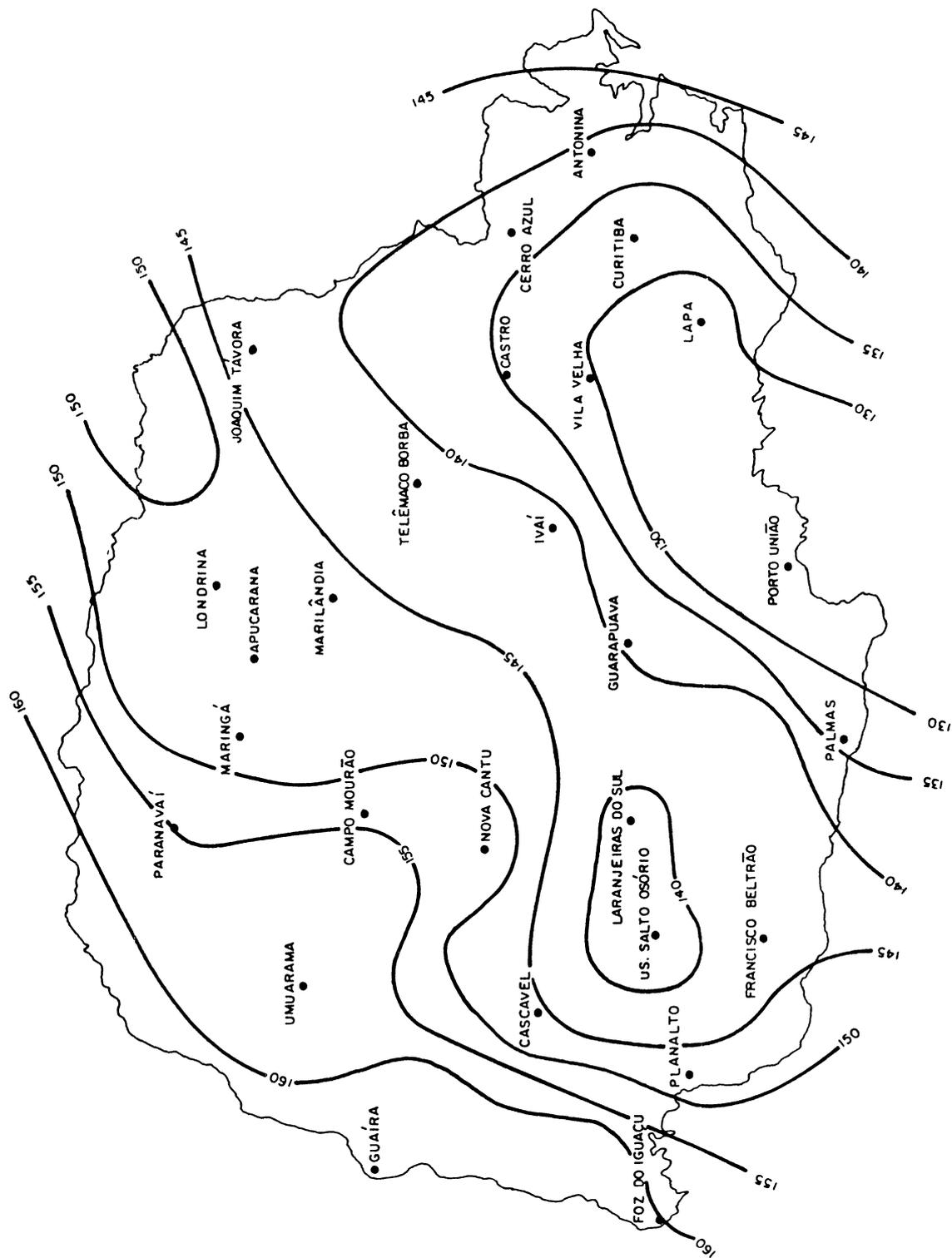


FIGURA 5.11 - ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO - MODELO CRAE (mm)

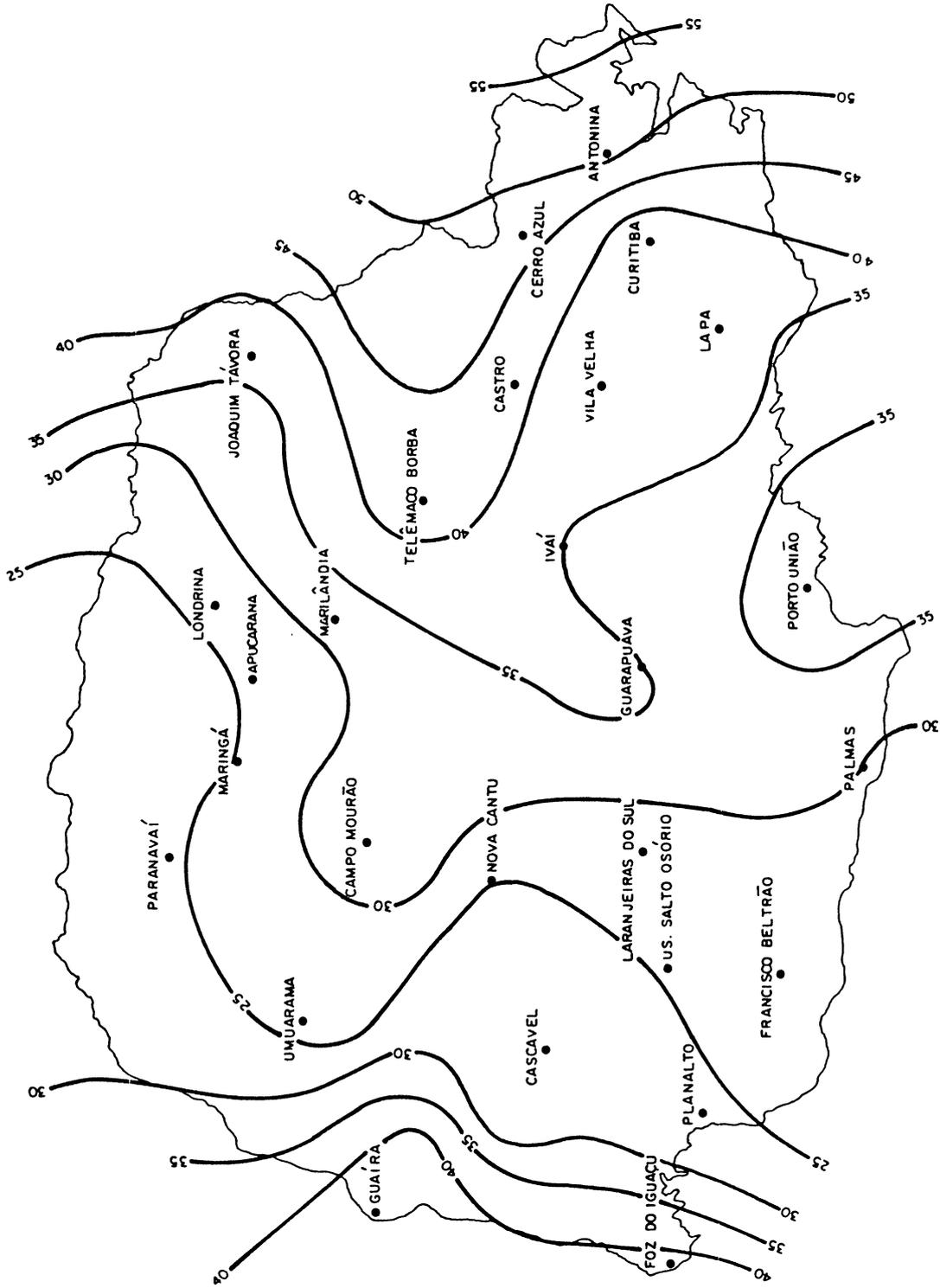


FIGURA 5.12 - ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO POTENCIAL - TOTAL ANUAL MÉDIO - MODELO DE PENMAN (mm)

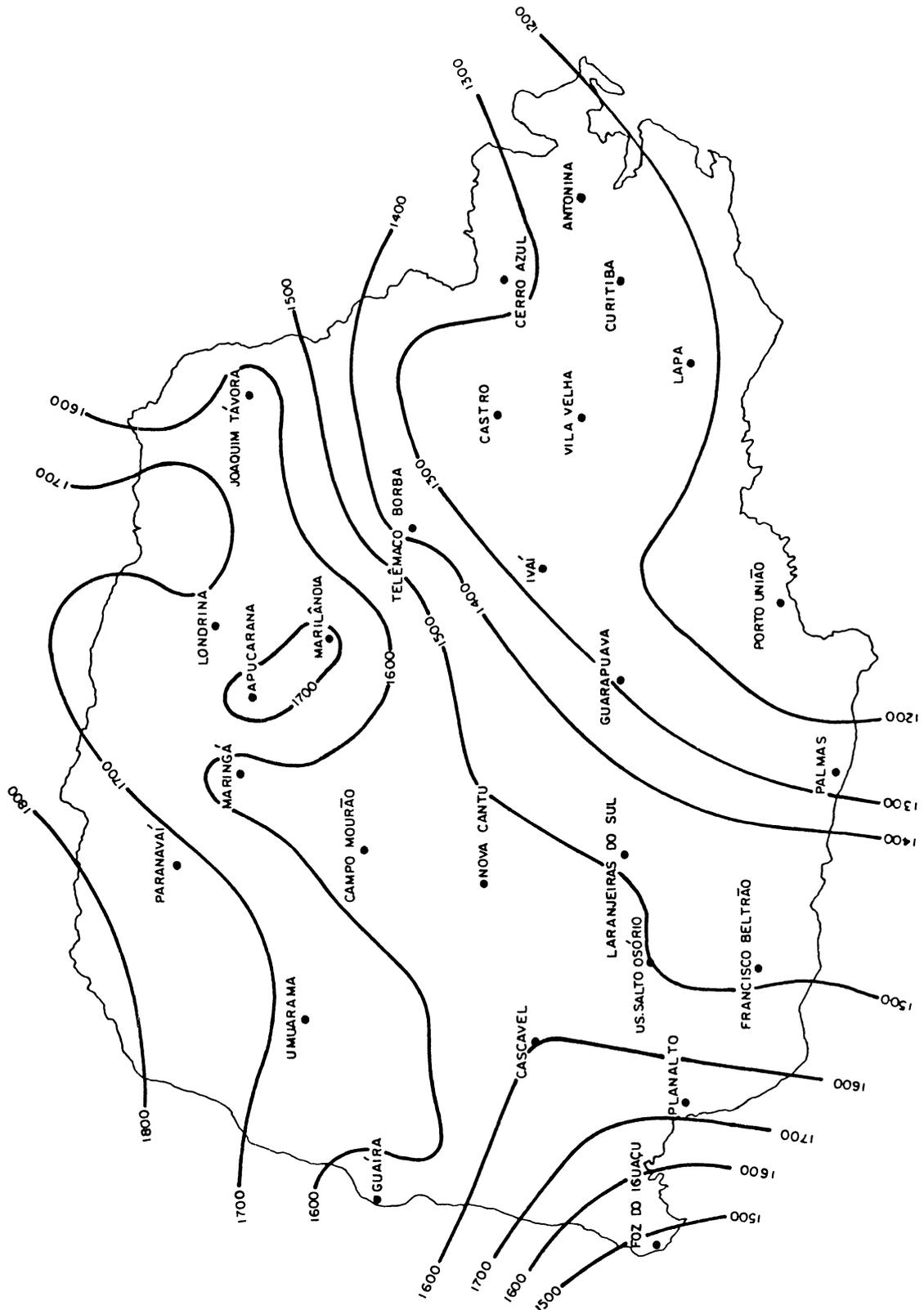


FIGURA 5.13 -- ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO POTENCIAL -- TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO -- MODELO DE FENMAN (mm)

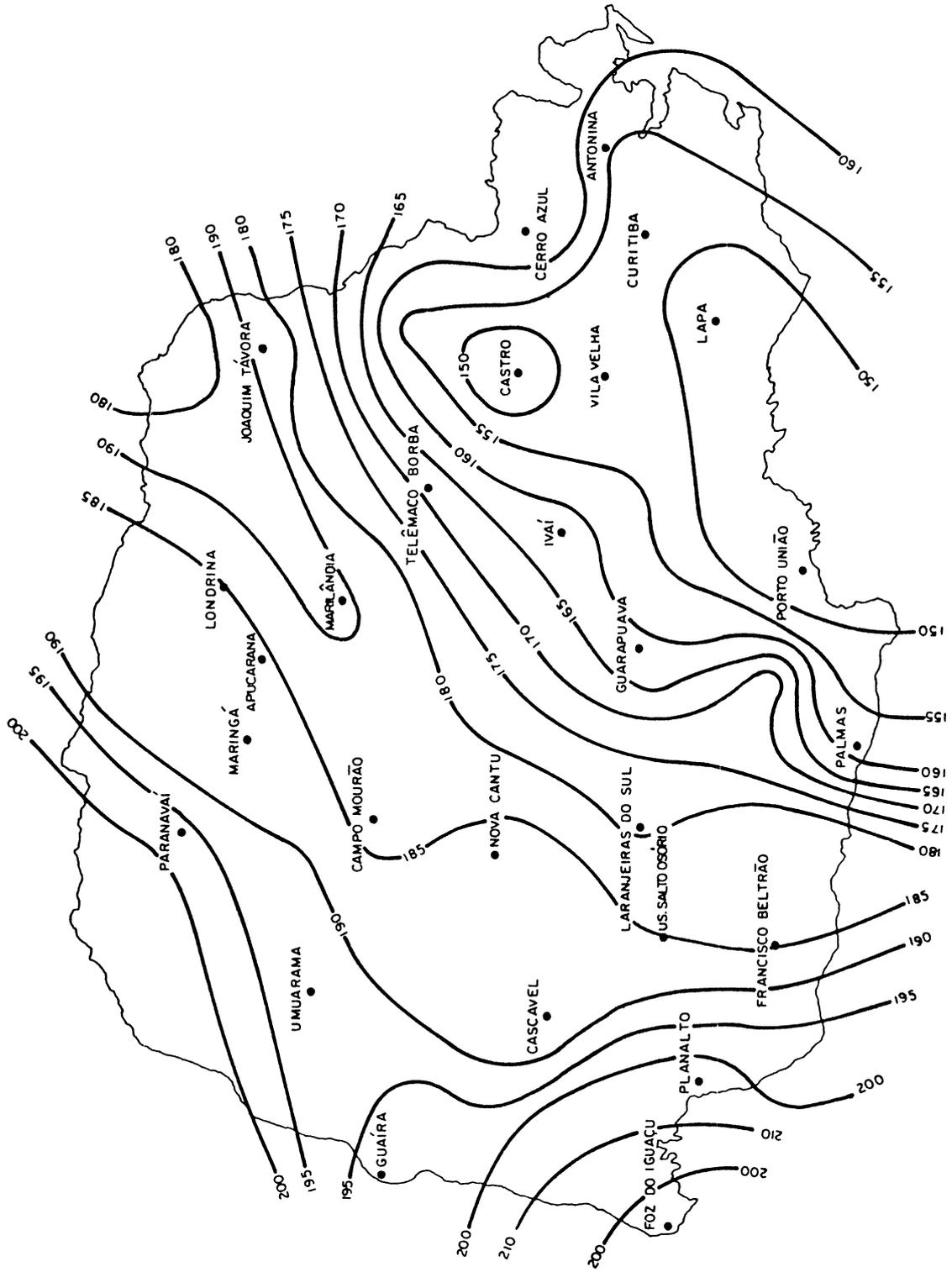


FIGURA 5.14 — ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO POTENCIAL — TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO — MODELO DE PENMAN (mm)

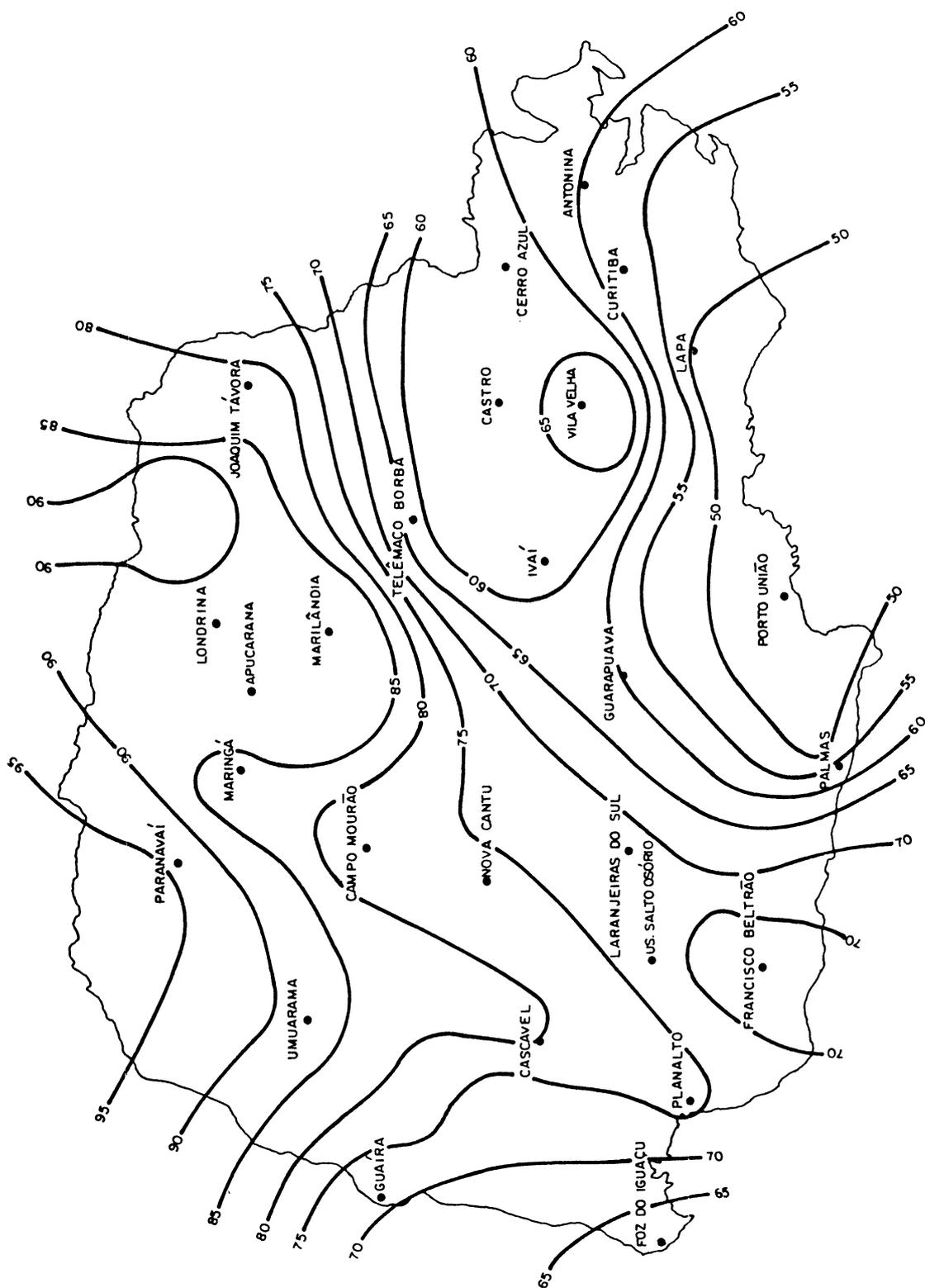


FIGURA 5.15 – ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO DE SUPERFÍCIE LÍQUIDA – TOTAL ANUAL MÉDIO – MODELO CRLE (mm)

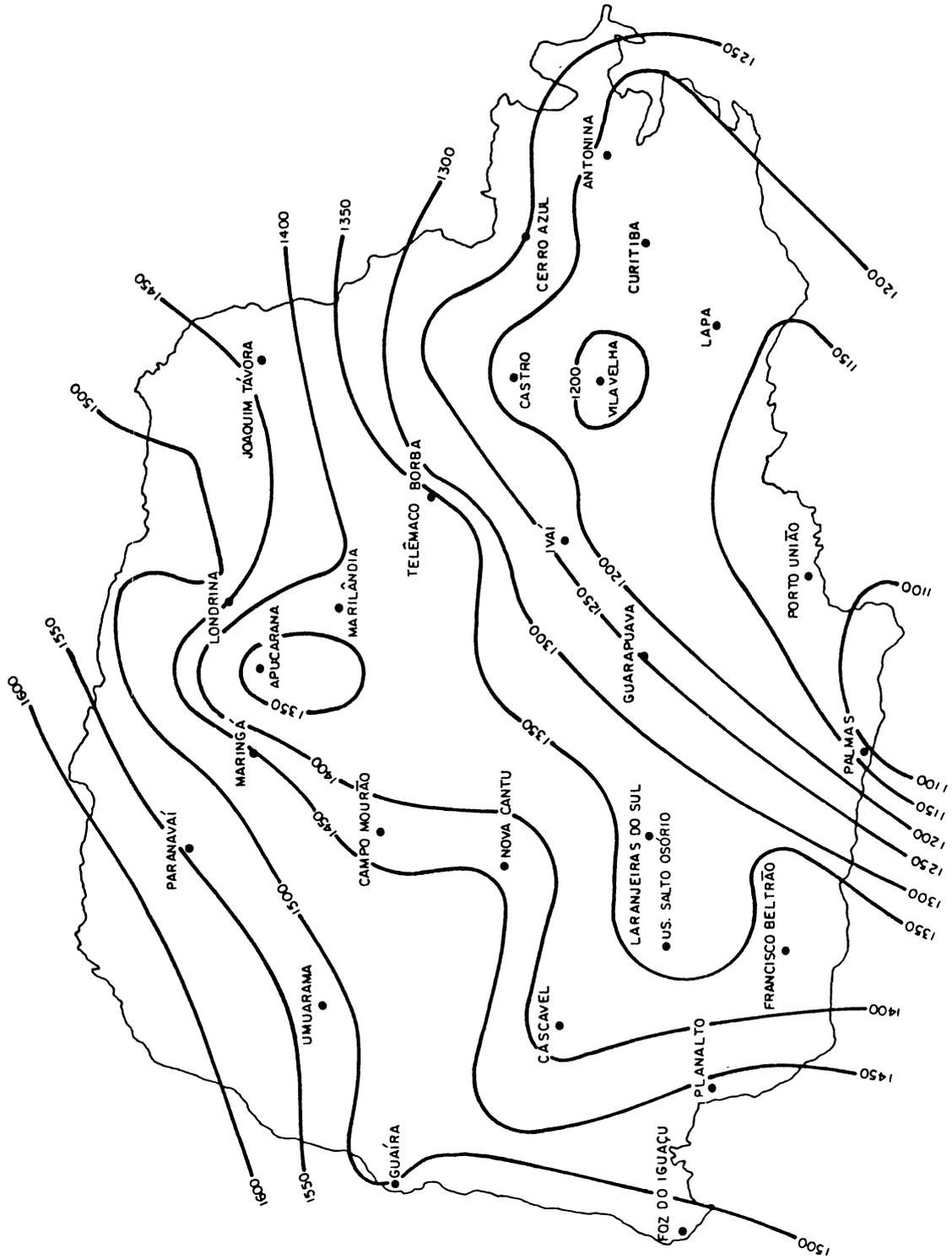


FIGURA 5.16 – ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO DE SUPERFÍCIE LÍQUIDA – TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JANEIRO – MODELO CRLE (mm)

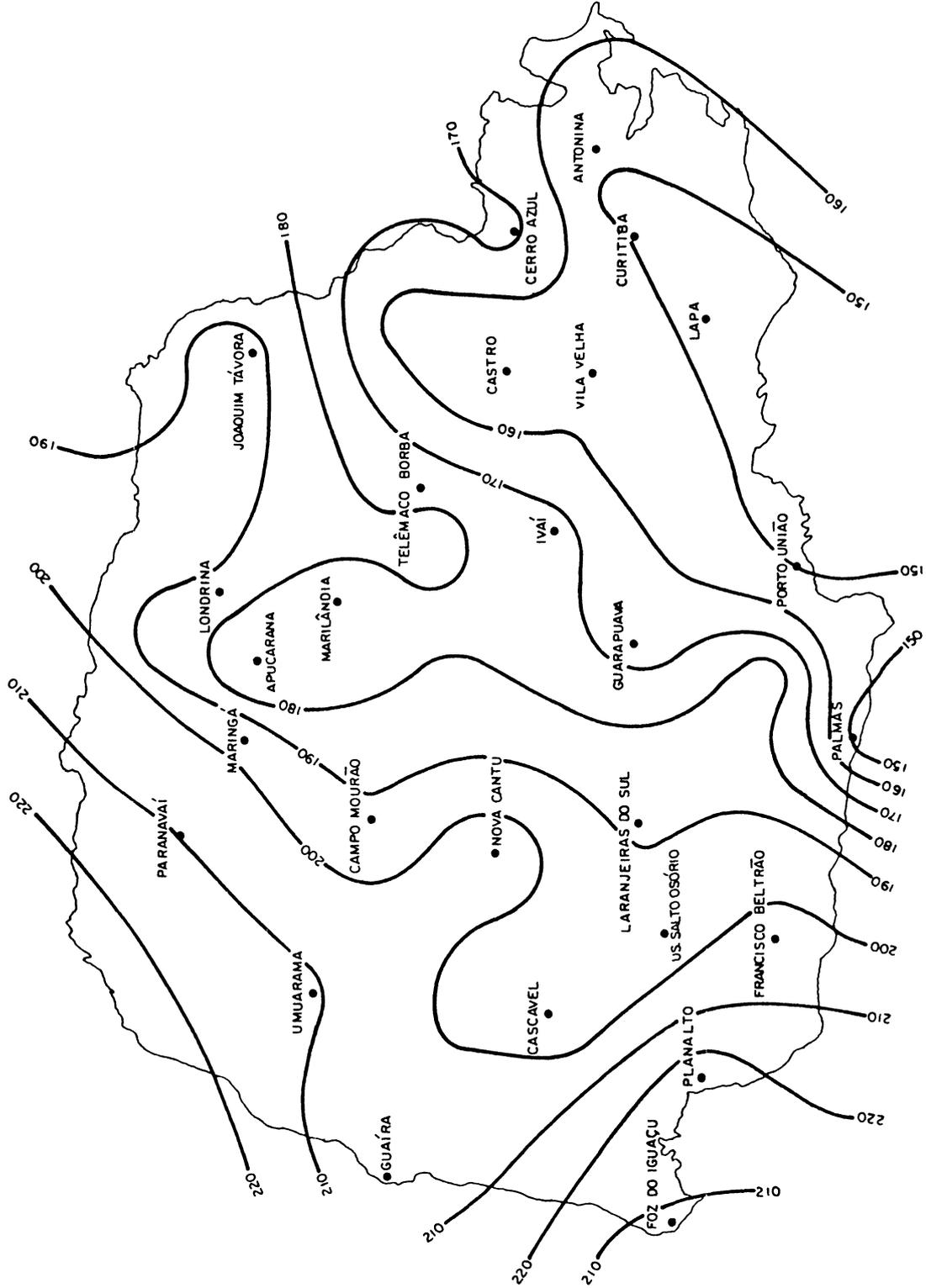
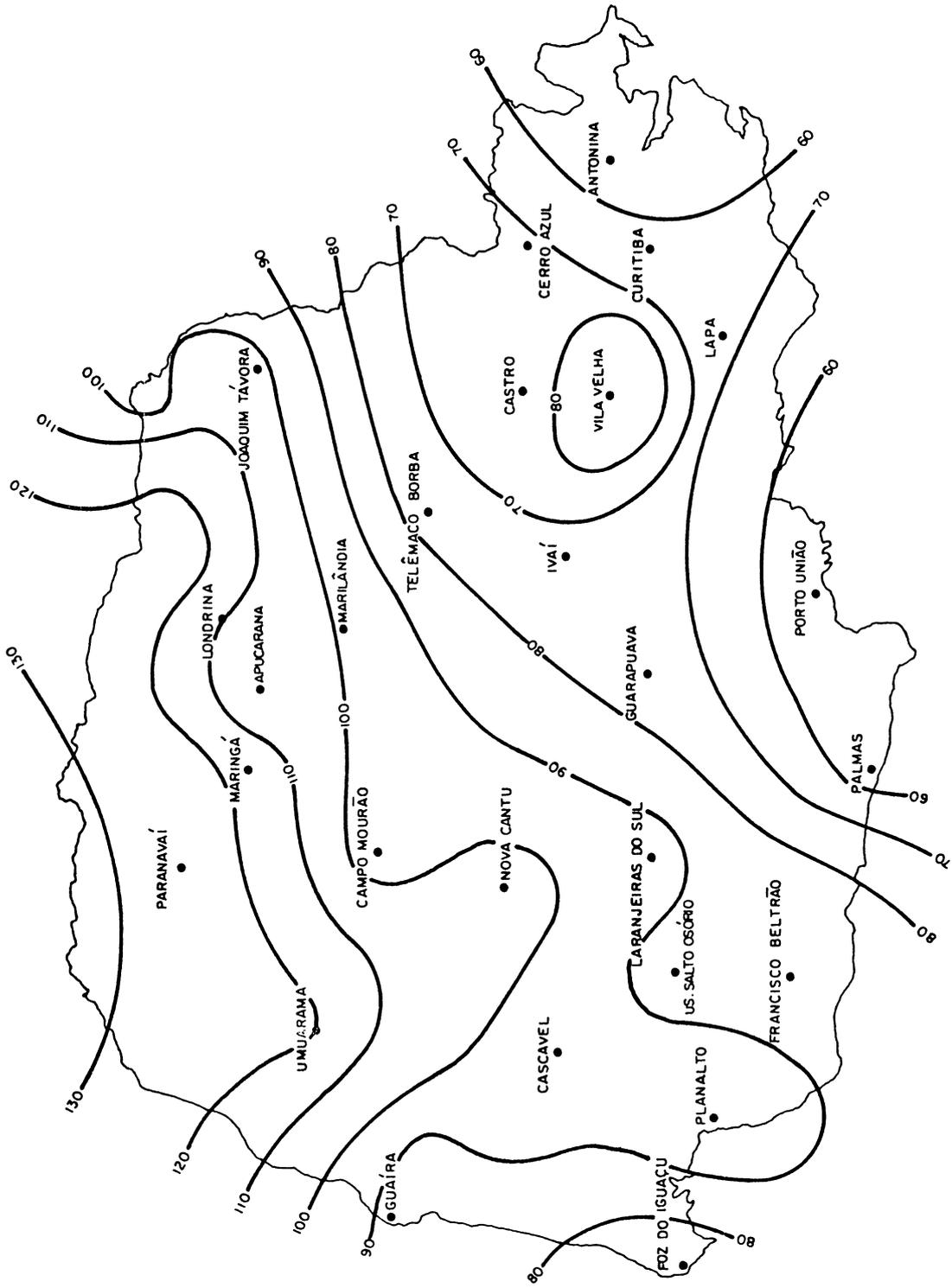


FIGURA 5.17 - ISOLINHAS DE EVAPORAÇÃO DE SUPERFÍCIE LÍQUIDA - TOTAL MÉDIO DO MÊS DE JULHO - MODELO CRLE (mm)



## 5.4 MEDIDAS DIRETAS DE EVAPORAÇÃO

Até o presente, estimativas de evaporação com base em medições diretas dos fluxos turbulentos ou medições dos índices de refração, não estão disponíveis para o Estado do Paraná. Existem apenas as medidas obtidas no evaporímetro Piché e no tanque classe A, cujos resultados são questionáveis como exposto na seção 3.2.7. A tabela 5.4 mostra, para algumas estações, estas medidas diretas e também valores de evaporação potencial segundo Penman e da evaporação de lago pelo modelo CRLE a título de comparação.

TABELA 5.4 - MEDIDAS DIRETAS DE EVAPORAÇÃO E ESTIMATIVAS ATRAVÉS DE MODELOS PARA O PARANÁ (mm/ano)

ESTAÇÃO	NÚMERO DE ANOS	TANQUE	TANQ*0,7	PICHÉ	PENMAN	CRLE
Bela V. Paraíso	4	1849	1294	959	1670	1501
Joaquim Távora	4	2191	1534	1011	1617	1480
Londrina	9	1598	1119	1392	1621	1490
Paranavaí	3	2250	1575	1220	1632	1538
Telêmaco Borba	4	1276	893	802	1371	1306
Curitiba	8	1134	794	840	1183	1159
S. Miguel Iguaçu	6	1627	1139	1060	1663	1494
Palmas	4	1574	1102	797	1456	1237
Média		1687	1181	1010	1527	1401
Desvio Padrão		396	277	211	175	144

A tabela 5.4 mostra que existem diferenças significativas entre os valores medidos e teóricos, o que reforça a necessidade de se dispor de medidas diretas mais confiáveis, e assim permitir a escolha do modelo que mais se aproxima da realidade.

## 5.5 EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM TANQUE CLASSE A

Os dados de evaporação em tanques classe A são pouco comuns nas estações meteorológicas brasileiras. O que se encontra com frequência são séries longas de evaporação medidas no evaporímetro Piché. Isto tem motivado pesquisas de análise de regressão múltipla, relacionando os dados de evaporação em tanques classe A com os dados do evaporímetro Piché e também com outras grandezas meteorológicas.

Neste trabalho foram definidas equações de regressão para determinação de evaporação em tanque classe A para as cidades onde se dispunham dados de tanque (tabela 5.4), e equações para o Estado do Paraná. Para cada cidade, bem como para o Estado, foram obtidas nove equações diferentes, relacionando a evaporação no tanque classe A com a evaporação do Piché, temperatura, precipitação, insolação e nebulosidade.

A análise de regressão múltipla foi efetuada considerando o logaritmo da variável dependente uma função linear dos logaritmos das variáveis independentes, como mostra a equação (5.1):

$$\ln(\text{EVT}) = a + b * \ln(\text{PIC}) + c * \ln(\text{TEM}) + d * \ln(\text{PRE}) + e * \ln(\text{INS}) + f * \ln(\text{NEB}) \quad (5.1)$$

onde:

EVT = evaporação média mensal em tanque classe A (mm);

PIC = evaporação média mensal no Piché (mm);

TEM = temperatura média mensal ( $^{\circ}\text{C}$ );

PREC = precipitação total mensal (mm);

INS = insolação média mensal (h);

NEB = nebulosidade média mensal;

a, b, c, d, e, f = constantes da regressão.

A tabela 5.5 mostra as constantes das equações de regressão obtidas para a cidade de Curitiba, e seus coeficientes de correlação e erros padrão da estimativa. As mesmas variáveis para o Estado do Paraná, para o mês de outubro, estão mostradas na tabela 5.6.

Os coeficientes de correlação altos obtidos indicam a possibilidade destas equações serem usadas quando se pretende obter séries mais longas de evaporação em tanques e, a partir daí, calibrando-se um coeficiente de tanque adequado como exposto na seção 3.2.7, obter a evaporação em lagos ou reservatórios. É possível também obter equações de regressão usando como variável dependente outras estimativas de evaporação ou evapotranspiração, como por exemplo as estimativas obtidas pelos modelos CRAE, CRLE e balanço hídrico, tornando mais simples os estudos de extensão de séries e de preenchimento de falhas.

TABELA 5.5 - CONSTANTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO MENSAIS PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM TANQUE CLASSE A, VÁLIDAS PARA A CIDADE DE CURITIBA - PR

a	b (PIC)	c (TEM)	d (PRE)	e (INS)	f (NEB)	CORR	EPE
-4,540	0,529	1,005	-0,051	0,598	0,652	0,900	0,026
-0,749	0,906					0,654	0,069
-1,802	0,741	1,144				0,846	0,035
0,146	0,982		0,065			0,673	0,067
-0,055	0,814			0,239		0,664	0,072
-1,579	0,627	1,347	-0,072			0,860	0,033
-3,273	0,556	1,263		0,385		0,884	0,028
-2,974	0,504	1,389	-0,047	0,339		0,890	0,028
-1,184	0,862		0,086	0,349		0,696	0,067

TABELA 5.6 - CONSTANTES DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM TANQUE CLASSE A, VÁLIDAS PARA O MÊS DE OUTUBRO PARA O PARANÁ

a	b (PIC)	c (TEM)	d (PRE)	e (INS)	f (NEB)	CORR	EPE
-0,368	0,022	0,403	0,085	0,751	-0,196	0,930	0,011
3,029	0,423					0,554	0,053
1,983	0,220	0,671				0,591	0,051
2,209	0,468		0,125			0,611	0,049
0,307	0,085			0,803		0,694	0,041
1,506	0,306	0,519	0,109			0,631	0,049
-1,336	-0,214	0,888		0,880		0,745	0,037
-1,541	-0,130	0,763	0,082	0,839		0,762	0,036
-0,264	0,141		0,107	0,764		0,728	0,039

#### 5.6 COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL OBTIDAS PELOS MODELOS CRAE E BALANÇO HÍDRICO

O método do balanço hídrico, conforme metodologia descrita na seção 4.2.3.2, foi aplicado a 24 bacias hidrográficas do Estado do Paraná, com áreas de 60 a 8000 km<sup>2</sup>. As características de cada uma das bacias estão descritas na tabela 5.7.

**TABELA 5.7 - RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL  
PELO BALANÇO HÍDRICO E MODELO CRAE**

RIO	ESTACÃO FLUVIOMÉTRICA	ÁREA (km <sup>2</sup> )	PERÍODO DE DADOS	PREC. MÉD. (mm/ano)	VAZ. MÉD. (m <sup>3</sup> /s)	ESTACÃO METEOROLÓGICA	EVAPOT. REAL BALAN. HID.	EVAPOT. REAL (mm/ano) CRAE
Jordão	Santa Clara	3913	27/08/51 - 22/09/91	1783	104.88	Guarapuava	938	1074
Chopim	Salto Claudelino	1782	04/06/65 - 20/12/91	1934	54.09	Palmas	977	1000
Chopim	Porto Palmeirinha	3410	04/06/61 - 28/03/90	1931	99.19	Palmas	1014	991
Ribeira	Balsa do Cerro Azul	4570	04/07/72 - 13/05/91	1394	82.09	Cerro Azul	828	1038
Capivari	Bom Jardim	722	01/01/76 - 31/12/92	1512	13.89	Telêmaco Borba	905	1120
Mourão	Quinta do Sol	1534	24/10/74 - 06/06/91	1618	36.96	Cianorte	858	985
Ivaí	Tereza Cristina	3572	24/08/61 - 31/08/88	1530	73.81	Ivaí	878	938
Laranjinha	Porto Santa Terezinha	3445	29/08/74 - 22/06/90	1363	52.39	Bandeirantes	883	991
Cinzas	Tomazina	2015	01/12/71 - 01/12/91	1508	35.64	Joaquim Távora	950	1032
Tigre	Salto São Pedro	59	14/01/61 - 17/08/92	1531	1.1	Londrina	938	1030
Pirapó	Vila Silva Jardim	4627	20/12/67 - 25/10/91	1518	73.64	Maringá	1016	1130
Vitorino	Ponte Vitorino	545	16/04/73 - 06/12/91	1997	15.8	Francisco Beltrão	1083	995
Santana	Balsa do Santana	1720	15/04/73 - 28/08/91	1965	48.56	Francisco Beltrão	1075	991
Sapucai	Salto Sapucaí	535	17/04/73 - 26/11/91	1915	17.73	Cascavel	870	1002
Corumbataí	Ribeirão Raposo Tavares	3243	01/12/66 - 11/08/86	1748	71.19	Campo Mourão	1056	1126
Cavernoso	Usina Cavernoso	1500	06/06/73 - 27/05/90	1790	38.29	Laranjeiras do Sul	985	954
Nhundiaguara	Morretes	217	05/09/67 - 05/10/92	3020	13.47	Morretes	1062	1001
Negro	Rio Negro	3379	19/08/61 - 21/06/81	1406	69.51	Rio Negro	758	1006
Negro	Divisa	7970	24/03/61 - 28/03/81	1405	147.05	Rio Negro	823	1006
Espingarda	Porto Vitória	165	16/01/61 - 20/09/78	1652	4.22	Porto União	845	965
Iguaçu	Porto Amazonas	3662	15/08/51 - 09/12/89	1393	63.5	Curitiba	846	1025
Goio - Eré	Balsa do Goio-Eré	2424	20/12/71 - 20/12/89	1582	48.2	Umuarama	955	1009
Jangada	Jangada	1055	03/02/61 - 30/12/78	1618	25.89	Porto União	844	965
Pequeno	Fazendinha	110	06/12/70 - 24/11/91	1594	2.63	Piraquara	840	1013

O período de dados a ser usado foi escolhido de modo que o início e o fim do período se encontrassem em condições semelhantes de armazenamento, isto é, períodos de recessão com vazões aproximadamente iguais. Para a determinação da precipitação média na bacia foi adotada a técnica dos polígonos de Thiessen, tendo como regra a existência de pelo menos 3 estações pluviométricas na bacia, para cada intervalo de tempo.

A tabela 5.8 compara os resultados de evapotranspiração real pelos modelos CRAE e balanço hídrico com as evapotranspirações potenciais dos modelos Penman e CRAE. Nota-se pelos resultados obtidos, que em média o modelo CRAE fornece estimativas de evapotranspiração real 10% superiores às estimativas do balanço hídrico, sendo estas estimativas mais próximas aos resultados de evapotranspiração potencial de Penman do que as do balanço hídrico.

O gráfico da figura 5.18 mostra as evapotranspirações reais CRAE plotadas contra as correspondentes evapotranspirações reais pelo balanço hídrico simplificado.

Analisando este gráfico, nota-se que 90% dos pontos estão dentro da faixa de  $\pm 22\%$  em relação ao balanço hídrico, amplitude esta que pode ser considerada bastante satisfatória em estudos de eventos hidrológicos tão difíceis de serem avaliados como a evapotranspiração real.

A figura 5.19 ilustra através de isolinhas a variação da evapotranspiração real obtida pelo balanço hídrico para o Estado. Nota-se que a evapotranspiração real cresce de 750 a 1050 mm/ano no sentido sudeste para noroeste, semelhante à direção de crescimento das grandezas das figuras 5.3 a 5.17.

**TABELA 5.8 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E POTENCIAL (mm/ano)**

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	ESTAÇÃO METEOROLÓGICA		EVAPOT. REAL		EVAPOT. POTENCIAL		DIFERENÇAS		
	BAL. HID.	CRAE	PENMAN	CRAE*	CRAE/PEN	CRAE/CRAE*	B.HID/PEN	CRAE/BH	
Santa Clara	938	1074	966	1349	1.112	0.786	0.971	1.145	
Salto Claudelino	977	1000	956	1257	1.046	0.796	1.022	1.024	
Porto Palmeirinha	1014	991	924	1222	1.073	0.811	1.097	0.977	
Balsa do Cerro Azul	828	1038	1110	1393	0.935	0.745	0.746	1.254	
Bom Jardim	905	1120	1061	1452	1.056	0.771	0.853	1.238	
Quinta do Sol	858	985	1415	1905	0.696	0.517	0.606	1.148	
Tereza Cristina	878	938	958	1341	0.979	0.699	0.916	1.068	
Porto Santa Terezinha	883	991	1528	1890	0.649	0.524	0.578	1.122	
Tomazina	950	1032	1399	1757	0.738	0.587	0.679	1.086	
Salto São Pedro	938	1030	1189	1798	0.866	0.573	0.789	1.098	
Vila Silva Jardim	1016	1130	1196	1884	0.945	0.600	0.849	1.112	
Ponte Vitorino	1083	995	1903	1092	0.992	0.911	1.080	0.919	
Balsa do Santana	1075	991	1003	1092	0.988	0.908	1.072	0.922	
Salto Sapucaí	870	1002	1327	1677	0.755	0.597	0.656	1.152	
Ribeirão Raposo Tavares	1056	1126	1168	1652	0.964	0.682	0.904	1.066	
Usina Cavernoso	985	954	1223	1607	0.780	0.594	0.805	0.969	
Morretes	1062	1001	961	1226	1.042	0.816	1.105	0.943	
Rio Negro	758	1006	903	1219	1.114	0.825	0.839	1.327	
Divisa	823	1006	903	1219	1.114	0.825	0.911	1.222	
Porto Vitória	845	965	896	1241	1.077	0.778	0.943	1.142	
Porto Amazonas	846	1025	932	1232	1.100	0.832	0.908	1.212	
Balsa do Goio-Eré	955	1009	1404	1965	0.719	0.513	0.680	1.057	
Jangada	844	965	896	1241	1.077	0.778	0.942	1.143	
Fazendinha	840	1013	957	1111	1.059	0.912	0.878	1.206	
Média	926.125	1016.125	1094.917	1450.917	0.953	0.725	0.868	1.106	
Desvio Padrão	91.782	50.920	196.838	292.227	0.151	0.130	0.154	0.109	

FIGURA 5.18 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PELO MODELO CRAE EM FUNÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PELO BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO.

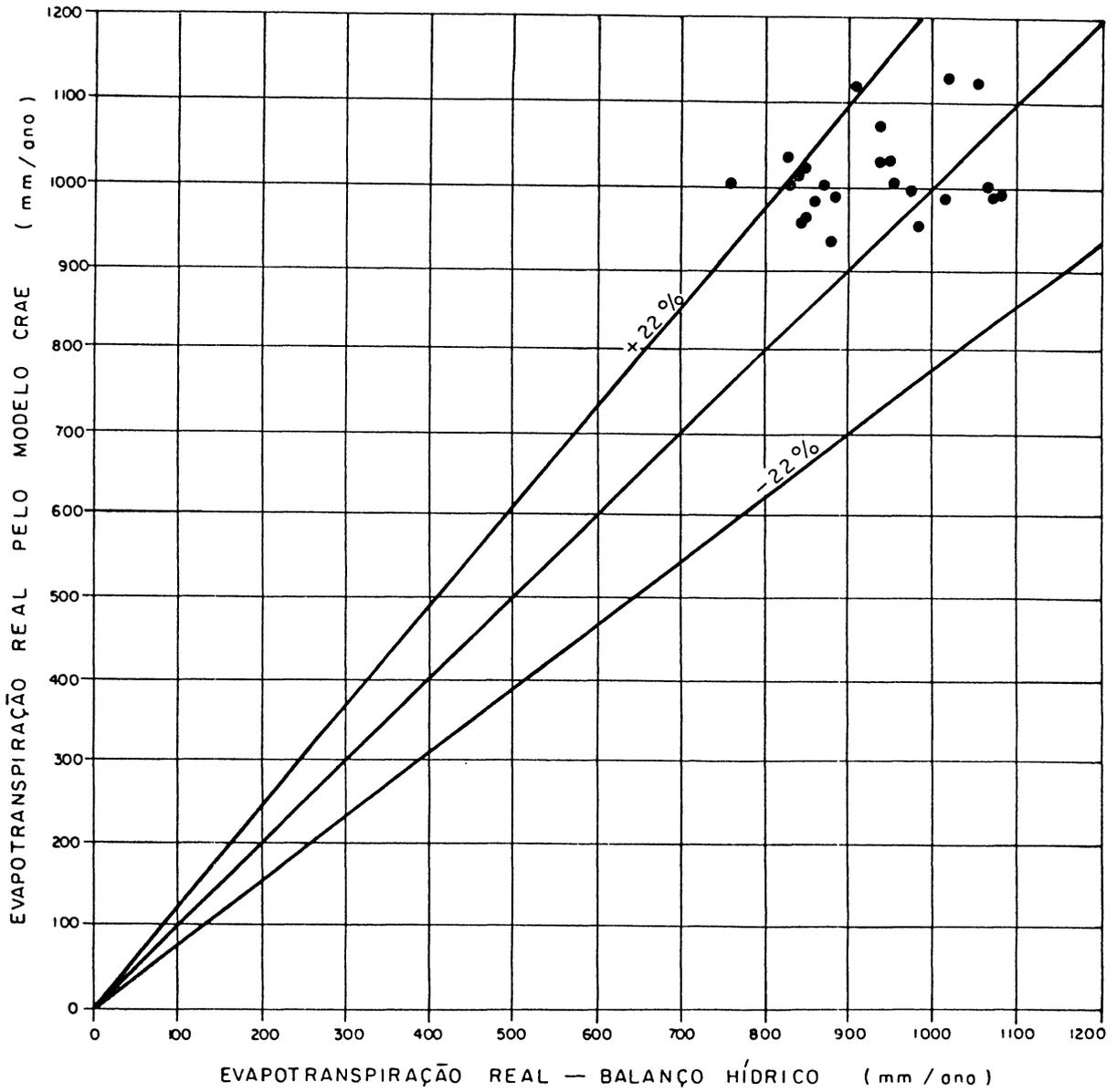
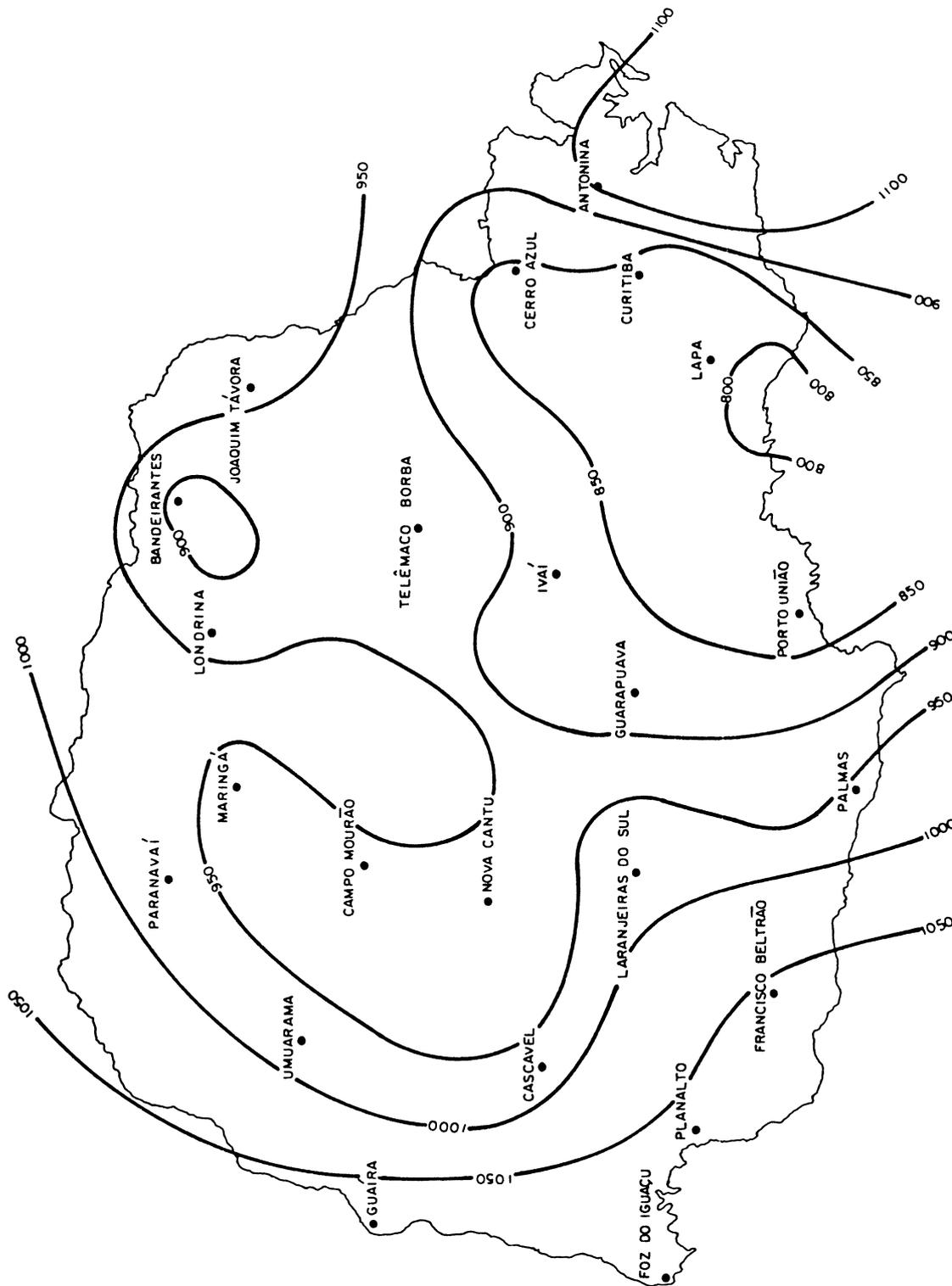


FIGURA 5.19 – ISOLINHAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL - TOTAL ANUAL MÉDIO DE LONGO PERÍODO – BALANÇO HÍDRICO (mm)



## 5.7 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS USANDO OS DADOS NORMAIS PUBLICADOS E DADOS DIÁRIOS

No trabalho de ILLICH (1993) estão publicados resultados de evapotranspiração e evaporação pelos modelos CRAE e CRLE, para diversas regiões do Brasil, obtidos a partir dos dados normais referentes ao período 1961 a 1990. Dados normais são médias de longo período de diferentes variáveis meteorológicas, calculadas em geral sobre um período de 30 anos, e publicados pelo Ministério da Agricultura e Reforma Agrária para um conjunto de estações selecionadas (BRASIL, 1992).

As tabelas 5.9 e 5.10 mostram, respectivamente, os resultados de evaporação e evapotranspiração obtidos a partir dos dados normais do período 1961 a 1990 e os obtidos usando os dados médios diários, considerando as estações do Estado do Paraná.

TABELA 5.9 - EVAPORAÇÃO MÉDIA ANUAL A PARTIR DE DADOS NORMAIS E DIÁRIOS PARA O PARANÁ (mm)

LOCAL	EVAPORAÇÃO DE LAGO		EVAPORAÇÃO POTENCIAL	
	NORMAIS	DIÁRIOS	NORMAIS	DIÁRIOS
Jacarezinho	1373	1482	1795	1814
Londrina	1357	1462	1768	1827
Castro	1018	1161	1149	1241
Campo Mourão	1264	1397	1640	1687
Guaíra	1396	1443	1665	1689
Paranaguá	1075	1174	1282	1262
Curitiba	1068	1169	1222	1282
Foz do Iguaçu	1231	1409	1420	1601
Rio Negro	906	1147	1061	1267
Média	1188	1316	1445	1519
Desvio Padrão	177	148	280	252

TABELA 5.10 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO MÉDIA ANUAL (EVAPOT) A PARTIR DE DADOS NORMAIS E DIÁRIOS PARA O PARANÁ (mm)

LOCAL	EVAPOT. REAL		EVAPOT. POTENCIAL	
	NORMAIS	DIÁRIOS	NORMAIS	DIÁRIOS
Jacarezinho	886	1095	1770	1765
Londrina	882	1037	1742	1787
Castro	872	1042	1123	1190
Campo Mourão	828	1057	1616	1640
Guaíra	1085	1156	1621	1654
Paranaguá	842	1124	1258	1260
Curitiba	887	1017	1180	1232
Foz do Iguaçu	1014	1180	1380	1541
Rio Negro	737	993	1047	1219
Média	893	1078	1415	1476
Desvio Padrão	102	64	278	249

Observa-se pelas tabelas 5.9 e 5.10 que os resultados para evaporação potencial e evapotranspiração potencial calculados usando os dados normais ou diários praticamente não diferem entre si. No caso dos resultados para a evaporação de lago e evapotranspiração real os dados normais produzem resultados sempre inferiores aos obtidos usando os dados diários.

Para verificar estatisticamente estas diferenças podemos aplicar às séries das tabelas 5.9 e 5.10 testes estatísticos de igualdade de médias. Neste trabalho foram aplicados os testes T (paramétrico) e Wilcoxon (não-paramétrico) (KOCH e RÊGO, 1985; SNEDECOR e COCHRAN, 1957), cujas estatísticas estão mostradas nas tabelas 5.11 e 5.12, respectivamente. Lembrando que para o teste T a hipótese básica é rejeitada para  $t > t_{crít}$  e para o teste Wilcoxon a hipótese é rejeitada quando  $W < W_{crít}$ .

TABELA 5.11 - ESTATÍSTICAS DO TESTE T

ESTIMADOR	$\nu$	$t_{\text{crít}}$	$t_{0,95}$	$t_{0,99}$
Evaporação potencial	16	0,591	2,120	2,921
Evaporação de lago	16	1,674	2,120	2,921
Evapotranspiração potencial	16	0,492	2,120	2,921
Evapotranspiração real	16	4,606	2,120	2,921

TABELA 5.12 - ESTATÍSTICAS DO TESTE WILCOXON

ESTIMADOR	W	$W_{0,95}$	$W_{0,99}$
Evaporação potencial	76,5	63	56
Evaporação de lago	65	63	56
Evapotranspiração potencial	77	63	56
Evapotranspiração real	51	63	56

Os resultados obtidos para os testes T e Wilcoxon, mostram que a hipótese básica de igualdade de médias, considerando os níveis de significância de 1% e 5% é rejeitada apenas para a evapotranspiração real, o que confirma a dificuldade de se obter a evapotranspiração real usando os dados normais.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Buscar técnicas cada vez mais precisas para avaliação da evaporação e evapotranspiração tem motivado a realização de muitos trabalhos nos últimos anos. Modelos cada vez mais sofisticados têm aparecido. Apesar de todo esse avanço tecnológico, o problema da falta de dados tem dificultado o uso dos modelos teóricos mais avançados. Desta forma, a falta de medidas diretas de evaporação e de evapotranspiração dificulta a validação dos modelos de cálculo de evaporação e de evapotranspiração para o Estado do Paraná, ficando a escolha do modelo geralmente condicionada a questões operacionais (dados disponíveis, conhecimento maior de determinado modelo, uso consagrado).

As principais conclusões desta dissertação podem ser assim resumidas:

a) Modelos empíricos de avaliação da evapotranspiração potencial como Thornthwaite e Blaney-Criddle devem ser usados com extremo cuidado. Estes modelos, definidos para condições climáticas diferentes das nossas, podem conduzir a estimativas errôneas de evapotranspiração potencial. Os erros são maiores

para os meses quentes, isto se deve, provavelmente, ao fato que as equações foram definidas para latitudes maiores onde predominam temperaturas médias menores do que as do Estado do Paraná. A fórmula empírica de Hargreaves e o modelo CRAE produzem resultados conservadores para a evapotranspiração potencial, e podem ser usados quando a disponibilidade de dados não permitir o emprego do método de Penman.

b) Para determinação da evapotranspiração real o modelo CRAE é bastante razoável. As diferenças em relação ao balanço hídrico são, em 90% dos casos, inferiores a 22%, sendo que em média o modelo produz resultados 10% maiores, o que é bastante satisfatório em estudos de eventos hidrológicos tão difíceis de serem avaliados. Além disso, o modelo CRAE permite que se obtenha valores sazonais de evapotranspiração real, que não podem ser obtidas pelo balanço hídrico.

c) O uso da fórmula empírica de Turc para avaliação da evaporação potencial deve ser evitado pois subestima os resultados. Os resultados obtidos pela fórmula de Turc são inferiores aos resultados de evapotranspiração real obtidos pelos modelos do balanço hídrico e CRAE. Assim, para determinação da evaporação potencial deve-se usar o método de Penman quando se dispôr dos dados necessários, ou o método CRLE que produz estimativas mais conservadoras. Para a evaporação de lago o modelo CRLE é indicado, fornecendo estimativas sempre inferiores às da fórmula de Penman, o que é fisicamente correto.

d)O uso de normais climatológicas no cálculo da evaporação e evapotranspiração deve, sempre que possível, se restringir aos casos em que se deseja calcular a evaporação ou evapotranspiração potencial. Na avaliação da evaporação de lago e da evapotranspiração real, o uso destes dados pode conduzir a erros consideráveis devido a não linearidade das fórmulas.

e)As equações de regressão para avaliação da evaporação em tanque classe A obtidas neste trabalho, apesar dos coeficientes de correlação altos e dos erros padrão da estimativa baixos, devem ser usadas, de preferência, de forma comparativa e somente para os locais para as quais foram determinadas. Além disso, essas equações permitem estimar apenas a evaporação em tanque classe A e não a evaporação de lago propriamente dita. Para transformar a evaporação medida no tanque em evaporação de lago existe o problema adicional de calibrar um coeficiente de tanque adequado.

f)A região noroeste do Estado do Paraná apresenta índices de umidade e precipitação baixos combinado com altas temperaturas, o que faz com que apresente altas taxas de evaporação e evapotranspiração, o que foi confirmado neste trabalho. Os totais anuais e mensais de evaporação e evapotranspiração crescem, no Estado do Paraná, da região sudeste para a região noroeste.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES

As principais recomendações desta dissertação são:

a) Evitar o uso das fórmulas empíricas. Sempre que possível dar preferência a modelos regionais que tenham sido calibrados para as condições locais. No caso da evapotranspiração potencial recomenda-se, para o Estado do Paraná, o uso do modelo de Penman. A fórmula de Hargreaves e o modelo CRAE também podem ser usados, porém produzem estimativas mais conservadoras.

b) Na avaliação da evapotranspiração real recomenda-se o uso do modelo CRAE quando não for possível o uso do balanço hídrico. Além da facilidade de uso, dos poucos dados necessários, o modelo CRAE fornece estimativas sazonais de evapotranspiração real, importantes em diversos estudos e que não podem ser obtidas pelo balanço hídrico.

c) Para avaliação da evaporação potencial recomenda-se o uso do método de Penman, quando se dispor dos dados necessários, ou o método CRLE em caso contrário. O uso do modelo de Turc deve ser evitado. No caso da avaliação da evaporação de lago recomenda-se o uso do modelo CRLE.

d) Dados normais publicados devem ser usados apenas nos casos em que se deseja calcular a evaporação potencial ou a evapotranspiração potencial.

e)As equações de regressão obtidas neste trabalho devem ser usadas de forma comparativa e somente para os locais para as quais foram determinadas.

f)É necessário que os diferentes órgãos que atuam na área de recursos hídricos invistam mais na formação e atualização dos bancos de dados existentes e na manutenção e ampliação da rede de estações de observação. Somente com dados de qualidade os modelos teóricos podem produzir bons resultados.

Como sugestão para pesquisa futura, é necessário que sejam feitas medidas diretas de evaporação pelos métodos de medição dos fluxos turbulentos. Somente com medidas diretas confiáveis os resultados dos modelos empíricos e semi-empíricos poderão ser aferidos e aperfeiçoados. Em particular, as diferenças entre os resultados do balanço hídrico e modelo CRAE poderão ser melhor esclarecidas.

Finalmente, é interessante mostrar que trabalhos desta natureza, além de importantes, acabam fazendo parte de estudos maiores. Neste caso, parte dos resultados aqui apresentados já estão sendo utilizados no Plano Diretor de Utilização dos Recursos Hídricos do Estado do Paraná, elaborado pela JICA - Japan International Cooperation Agency, em conjunto com diversos órgãos paranaenses ligados a área de recursos hídricos.

**APÊNDICE 1**

**VALORES MENSIS DE EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
PARA O ESTADO DO PARANÁ (mm)**

**VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)**

**ESTAÇÃO : 02251027 - BELA VISTA DO PARAÍSO PERÍODO : 11/71 - 10/92**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL				EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	TURC	CRLE
Jan	142	124	126	161	183	147	176	189	101	101	168	
Fev	123	111	111	141	161	119	152	166	88	88	144	
Mar	124	110	114	143	167	105	152	171	83	83	141	
Abr	99	82	100	122	143	73	122	146	67	67	113	
Mai	72	59	91	96	113	47	90	116	62	62	85	
Jun	59	46	83	81	98	31	74	99	47	47	69	
Jul	69	49	86	91	121	29	84	122	37	37	80	
Ago	91	62	94	108	150	36	109	151	35	35	98	
Set	104	69	98	113	153	59	125	154	60	60	110	
Out	137	96	113	149	199	99	164	193	81	81	149	
Nov	144	110	118	157	199	117	175	197	88	88	159	
Dez	135	118	126	149	171	127	165	175	98	98	152	
Total	1299	1036	1260	1511	1843	988	1588	1879	847	847	1468	

**ESTAÇÃO : 02349028 - JACAREZINHO PERÍODO : 01/61 - 12/85**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL				EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	TURC	CRLE
Jan	136	133	129	165	187	148	174	193	106	106	171	
Fev	119	120	113	146	165	129	153	171	101	101	151	
Mar	118	115	116	149	168	119	152	174	91	91	148	
Abr	88	80	99	121	132	82	116	137	60	60	113	
Mai	62	56	91	96	102	57	83	106	50	50	85	
Jun	46	43	82	78	83	41	64	86	46	46	66	
Jul	54	46	85	88	102	40	73	105	34	34	76	
Ago	76	60	93	107	134	49	99	136	33	33	97	
Set	89	78	100	112	147	63	114	149	57	57	109	
Out	117	98	114	143	177	102	149	180	83	83	143	
Nov	130	110	119	159	189	128	167	199	89	89	162	
Dez	129	124	128	155	179	137	164	184	102	102	161	
Total	1164	1063	1269	1519	1765	1085	1508	1814	852	852	1482	

**VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)**

**ESTAÇÃO : 02349030 - JOAQUIM TÁVORA PERÍODO : 10/71 - 10/92**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	154	130	128	162	188	142	187	193	100	168
Fev	135	116	112	144	168	122	164	172	92	148
Mar	133	112	115	140	162	107	161	167	88	139
Abr	108	81	99	118	133	76	131	137	62	109
Mai	72	55	89	86	98	48	89	100	62	77
Jun	60	41	81	75	84	34	74	86	45	63
Jul	73	44	84	83	102	32	88	104	38	72
Ago	98	55	91	101	130	45	116	131	39	92
Set	115	66	97	110	142	63	135	144	62	107
Out	145	92	112	146	178	106	174	182	79	147
Nov	153	107	118	159	189	126	186	194	84	162
Dez	146	123	127	153	182	131	177	186	99	159
Total	1392	1022	1253	1477	1756	1032	1682	1796	850	1443

**ESTAÇÃO : 02350017 - CAMBARÁ PERÍODO : 03/57 - 10/92**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	132	128	127	144	156	124	167	161	100	143
Fev	111	113	111	122	134	102	141	138	100	121
Mar	112	109	114	128	140	109	143	145	94	124
Abr	89	80	98	107	117	70	114	121	59	98
Mai	65	55	89	87	93	50	84	96	49	76
Jun	51	44	81	71	76	36	66	78	42	59
Jul	59	44	84	77	90	36	76	92	32	67
Ago	83	57	92	101	129	45	104	130	34	91
Set	98	71	99	105	140	55	120	141	50	101
Out	124	99	113	136	170	90	154	173	80	134
Nov	135	112	118	146	177	109	168	180	85	146
Dez	128	125	127	138	161	112	160	164	96	139
Total	1187	1037	1253	1362	1583	929	1497	1619	821	1299

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02350018 - BANDEIRANTES PERÍODO : 03/74 - 10/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO CRLE
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	155	134	129	170	193	154	190	199	103	177
Fev	137	119	113	149	173	126	166	178	93	153
Mar	134	115	116	141	163	107	161	168	88	140
Abr	110	86	101	118	137	71	132	140	67	109
Mai	79	59	92	91	100	45	96	108	62	80
Jun	65	44	83	80	96	31	80	97	43	68
Jul	81	48	87	91	119	29	96	120	34	79
Ago	113	61	95	110	154	35	132	154	29	100
Set	128	72	100	116	161	56	149	161	64	112
Out	171	104	115	153	199	98	199	201	82	153
Nov	165	118	121	163	201	124	198	204	100	166
Dez	157	128	129	162	198	139	190	195	105	168
Total	1495	1088	1281	1544	1892	1015	1789	1925	870	1505

ESTAÇÃO : 02351003 - LONDRINA PERÍODO : 01/76 - 10/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO CRLE
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	149	124	127	164	185	149	185	191	98	170
Fev	129	108	110	145	165	126	160	170	90	149
Mar	126	106	114	144	163	113	156	169	91	143
Abr	100	79	98	120	136	76	125	140	77	111
Mai	72	56	80	94	106	50	91	109	59	83
Jun	56	42	81	79	89	36	72	91	45	67
Jul	69	45	85	88	110	33	86	112	38	77
Ago	94	57	92	106	142	41	114	143	36	97
Set	106	67	97	112	152	58	128	153	64	109
Out	142	97	113	151	192	160	173	195	77	151
Nov	148	110	119	161	198	120	182	202	97	163
Dez	145	120	126	160	186	137	180	191	101	165
Total	1336	1011	1252	1524	1824	1039	1652	1866	873	1485

**VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)**

**PERÍODO : 01/65 - 10/92**

**ESTAÇÃO : 02351008 - APUCARANA**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO		
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	PENMAN	CRLE	CRLE
Jan	153	116	124	137	155	119	183	98	160	139	139
Fev	134	102	108	116	131	96	160	93	135	117	117
Mar	139	102	112	121	141	88	168	89	144	118	118
Abr	117	77	97	102	123	59	139	69	126	95	95
Mai	90	68	90	79	98	35	106	65	99	70	70
Jun	77	47	82	72	90	25	90	53	91	61	61
Jul	92	47	85	73	98	21	105	45	99	63	63
Ago	116	59	92	86	125	26	130	41	124	79	79
Set	127	67	97	97	133	45	144	65	134	92	92
Out	157	89	110	123	156	76	182	83	158	119	119
Nov	160	100	116	133	163	95	188	85	166	132	132
Dez	147	111	123	132	151	106	176	100	154	131	131
Total	1509	975	1236	1271	1564	791	1768	886	1590	1216	1216

**PERÍODO : 01/61 - 12/85**

**ESTAÇÃO : 02351010 - LONDRINA**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO		
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	PENMAN	CRLE	CRLE
Jan	135	125	127	162	184	145	173	106	189	168	168
Fev	119	110	111	145	165	127	153	98	170	149	149
Mar	115	107	114	144	164	113	148	88	169	143	143
Abr	90	78	98	121	140	75	118	67	143	112	112
Mai	65	54	90	98	111	49	87	55	114	86	86
Jun	48	40	81	79	88	37	66	52	91	67	67
Jul	56	43	85	89	108	36	75	38	110	77	77
Ago	78	59	92	106	139	44	102	39	140	96	96
Set	90	73	99	109	146	58	114	59	147	106	106
Out	116	91	112	139	173	97	147	86	176	139	139
Nov	131	107	118	156	190	121	167	89	194	159	159
Dez	130	119	126	154	179	135	165	106	184	160	160
Total	1173	1006	1253	1502	1787	1037	1515	883	1827	1462	1462

VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02351011 - IBIPORÁ PERÍODO : 11/71 -10/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	GRAE	GRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	153	131	129	164	188	146	186	194	103	171
Fev	133	117	113	146	171	122	163	176	98	151
Mar	133	115	116	148	176	109	162	180	94	147
Abr	108	85	101	123	148	71	131	151	75	114
Mai	78	60	92	98	118	44	95	120	63	86
Jun	63	45	83	82	99	30	78	101	47	69
Jul	74	48	87	91	119	29	90	120	39	79
Ago	101	62	94	109	152	35	120	152	38	98
Set	117	73	100	115	161	53	137	162	67	111
Out	154	103	115	152	199	94	182	201	80	151
Nov	159	117	120	162	206	116	190	209	93	165
Dez	150	126	128	158	188	135	182	192	107	164
Total	1423	1082	1278	1548	1925	984	1716	1958	904	1506

ESTAÇÃO : 02351013 - MARINGÁ PERÍODO : 01/61 - 08/89

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	GRAE	GRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	141	131	129	170	196	150	181	202	107	177
Fev	118	113	112	142	163	124	150	168	99	147
Mar	121	108	116	151	177	112	155	182	94	149
Abr	90	86	100	118	140	70	117	144	77	110
Mai	66	62	93	96	115	44	87	117	64	84
Jun	50	46	84	80	98	30	67	100	52	68
Jul	59	53	87	90	121	25	78	122	45	78
Ago	78	64	95	103	147	30	100	148	40	93
Set	91	75	100	110	159	47	114	159	58	107
Out	120	103	114	146	186	98	153	189	92	146
Nov	135	119	121	163	201	122	172	204	83	165
Dez	135	126	128	162	188	139	173	193	106	167
Total	1204	1086	1279	1531	1891	991	1547	1928	916	1491

**VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)**

**ESTAÇÃO : 02351063 - MARILÂNDIA PERÍODO : 08/78 - 10/92**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	GRAE	GRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	159	102	119	154	169	146	193	176	92	162
Fev	128	68	104	130	142	121	157	147	89	135
Mar	126	90	107	128	139	105	153	144	84	126
Abr	107	70	93	107	115	77	129	120	70	101
Mai	84	51	84	85	97	49	101	99	64	77
Jun	69	41	77	73	85	33	83	87	48	63
Jul	88	41	79	82	101	32	103	103	44	71
Ago	110	55	88	99	134	39	127	135	40	92
Set	125	59	91	106	141	61	144	143	62	106
Out	150	79	106	137	171	98	176	175	74	139
Nov	154	91	111	146	174	121	184	179	84	151
Dez	149	100	119	150	167	135	181	172	91	155
Total	1449	867	1178	1397	1635	1017	1731	1690	842	1378

**ESTAÇÃO : 02352017 - PARANAÍ PERÍODO : 06/74 - 10/92**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	GRAE	GRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	162	139	131	176	205	153	198	210	102	182
Fev	135	119	113	151	176	128	166	181	94	156
Mar	138	119	117	154	177	118	169	183	88	153
Abr	106	86	101	125	144	77	130	148	76	116
Mai	78	60	93	97	112	48	97	114	66	85
Jun	66	44	84	80	98	30	80	100	48	68
Jul	81	49	88	92	125	26	96	127	40	80
Ago	106	64	95	110	154	34	124	166	36	99
Set	112	72	100	114	156	57	132	157	68	110
Out	147	104	116	155	198	102	176	201	86	155
Nov	160	120	121	169	210	125	194	214	85	172
Dez	158	133	130	169	201	141	192	205	103	174
Total	1449	1109	1289	1592	1956	1039	1754	1936	892	1550

VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

PERÍODO : 10/71 - 10/92

ESTAÇÃO : 02352019 - CIANORTE

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL				EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	TURC	
Jan	158	133	129	171	196	150	192	202	104	104	177
Fev	135	115	112	147	170	127	165	175	94	94	152
Mar	134	115	116	149	176	110	163	181	88	88	148
Abr	104	82	100	117	140	68	126	143	77	77	108
Mai	75	58	91	90	107	42	91	109	67	67	79
Jun	60	44	83	77	92	29	74	94	49	49	65
Jul	73	46	86	85	113	26	87	114	46	46	74
Ago	95	59	93	100	138	33	112	139	52	52	90
Set	107	70	99	106	146	50	125	147	68	68	102
Out	142	99	114	149	191	97	170	194	84	84	148
Nov	156	115	120	164	207	119	187	210	85	85	167
Dez	155	129	129	166	196	140	188	201	105	105	171
Total	1394	1065	1272	1521	1872	991	1680	1909	919	919	1481

PERÍODO : 11/71 - 10/92

ESTAÇÃO : 02353008 - UMUARAMA

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL				EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	TURC	
Jan	157	139	130	175	207	146	192	212	100	100	180
Fev	135	120	113	151	179	124	164	184	94	94	155
Mar	135	117	117	155	186	110	165	190	87	87	153
Abr	101	84	100	122	149	66	123	151	78	78	113
Mai	74	60	92	95	117	38	92	120	69	69	83
Jun	62	45	83	79	101	25	76	103	53	53	67
Jul	75	50	87	87	119	21	89	122	46	46	75
Ago	92	60	93	99	142	29	108	142	56	56	90
Set	106	70	99	112	155	52	125	156	75	75	108
Out	140	100	115	150	195	96	168	198	88	88	150
Nov	153	116	121	168	214	120	186	217	94	94	171
Dez	158	132	130	174	209	142	192	213	105	105	179
Total	1388	1093	1280	1567	1973	969	1680	2008	945	945	1524

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02449013 - CERRO AZUL

PERÍODO : 04/72 - 10/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL					EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE		PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	CRLE
Jan	138	132	129	149	170	138		168	175	100	157	157
Fev	120	114	112	129	148	121		146	153	91	138	138
Mar	108	110	114	121	133	108		132	138	87	124	124
Abr	79	79	97	93	99	77		98	103	57	91	91
Mai	53	51	87	68	72	57		67	74	56	67	67
Jun	41	37	77	54	58	45		52	60	45	54	54
Jul	47	37	80	59	64	47		58	66	45	58	58
Ago	64	47	87	73	84	54		79	86	47	72	72
Set	80	59	93	85	99	66		97	102	60	85	85
Out	109	85	110	118	138	96		133	141	74	120	120
Nov	130	106	117	135	159	112		156	163	74	138	138
Dez	136	127	128	144	170	127		165	174	94	151	151
Total	1105	984	1231	1228	1394	1048		1351	1435	830	1255	1255

ESTAÇÃO : 02449019 - JAGUARIAÍVA

PERÍODO : 01/61 - 07/81

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL					EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE		PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	CRLE
Jan	117	102	119	143	148	138		153	156	83	150	150
Fev	106	95	105	132	133	125		139	140	85	135	135
Mar	98	91	107	126	121	114		129	128	82	123	123
Abr	72	62	90	102	95	83		98	101	51	95	95
Mai	48	43	81	79	69	58		68	73	39	69	69
Jun	36	36	73	64	53	43		52	56	47	52	52
Jul	43	34	76	72	64	50		61	68	37	62	62
Ago	61	50	84	90	88	64		83	93	41	81	81
Set	68	57	88	89	92	84		90	97	60	92	92
Out	103	81	103	128	136	115		134	142	73	131	131
Nov	114	83	108	139	149	131		149	155	75	145	145
Dez	110	104	118	131	137	129		142	143	88	137	137
Total	976	838	1152	1295	1285	1134		1298	1352	761	1272	1272

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02450010 - CASTRO

PERÍODO : 01/61 - 08/89

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	111	99	117	132	141	135	143	147	86	142
Fev	94	90	102	112	119	113	121	125	82	120
Mar	89	86	104	112	114	108	117	120	77	116
Abr	64	61	87	86	85	76	85	89	57	84
Mai	46	45	78	72	65	53	64	69	49	63
Jun	34	35	71	56	51	39	48	53	47	48
Jul	39	36	73	63	61	42	54	64	43	55
Ago	54	44	80	74	77	56	72	80	47	70
Set	65	51	86	80	88	69	85	91	60	82
Out	86	69	100	104	114	101	111	118	69	111
Nov	104	80	106	123	136	120	133	141	67	132
Dez	108	96	115	127	139	130	139	144	83	138
Total	894	792	1119	1141	1190	1042	1172	1241	767	1161

ESTAÇÃO : 02450011 - TELÉMACO BORBA

PERÍODO : 12/71 - 09/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	132	114	123	153	170	142	169	176	90	160
Fev	111	99	107	130	144	122	141	149	86	137
Mar	103	94	108	129	136	114	134	141	77	129
Abr	76	66	92	101	103	81	100	108	63	96
Mai	51	46	82	78	75	61	70	79	57	72
Jun	39	35	74	64	60	44	54	63	43	55
Jul	47	36	76	72	71	44	63	74	45	62
Ago	63	44	83	86	92	59	83	96	41	80
Set	78	55	89	96	111	72	101	114	62	95
Out	108	79	105	129	147	106	138	152	74	131
Nov	120	94	112	140	160	121	153	165	82	145
Dez	125	109	121	146	166	134	159	170	91	152
Total	1053	871	1172	1324	1433	1100	1365	1487	811	1314

VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

PERÍODO : 07/88 - 10/92

ESTAÇÃO : 02451052 - CÂNDIDO DE ABREU

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL					EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	132	121	125	156	177	142	142	168	183	91	164
Fev	128	104	109	159	183	130	130	163	189	74	161
Mar	106	100	111	132	141	111	111	137	147	89	131
Abr	80	74	95	111	110	84	84	105	116	81	102
Mai	54	49	84	86	84	56	56	74	88	67	75
Jun	40	41	77	66	64	37	37	55	66	58	54
Jul	44	31	76	73	75	40	40	60	78	42	62
Ago	68	45	86	92	106	52	52	89	109	49	84
Set	85	58	93	103	125	68	68	108	128	63	101
Out	116	88	109	139	161	110	110	148	166	83	140
Nov	134	103	115	157	184	129	129	170	189	70	161
Dez	146	120	127	172	195	152	152	186	201	91	178
Total	1133	934	1207	1446	1605	1111	1111	1463	1660	858	1413

PERÍODO : 01/61 - 01/86

ESTAÇÃO : 02452018 - CAMPO MOURÃO

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL					EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	140	125	127	167	184	154	154	179	191	97	173
Fev	116	110	110	139	154	127	127	148	159	94	144
Mar	113	106	113	137	154	111	111	145	159	80	137
Abr	88	75	96	113	127	72	72	114	131	55	105
Mai	61	56	88	86	94	49	49	81	98	56	76
Jun	45	40	79	69	75	36	36	61	77	55	59
Jul	56	43	82	81	91	38	38	74	94	45	69
Ago	73	53	89	91	113	45	45	94	114	44	83
Set	87	63	96	100	127	60	60	109	129	70	97
Out	116	89	111	135	162	100	100	147	166	89	135
Nov	132	102	117	152	182	122	122	167	187	82	156
Dez	135	117	126	158	177	143	143	172	182	101	163
Total	1162	979	1234	1428	1640	1057	1057	1491	1687	868	1397

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTACÃO : 02452050 - NOVA CANTU PERÍODO : 02/76 - 10/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	157	134	130	177	203	155	193	209	97	183
Fev	126	112	112	146	165	127	156	171	93	150
Mar	123	110	115	144	164	112	152	169	93	143
Abr	90	77	98	111	126	71	113	130	82	103
Mai	65	55	89	87	100	45	82	102	73	77
Jun	51	41	80	69	81	27	63	83	60	58
Jul	63	46	84	81	104	25	76	106	53	69
Ago	82	57	92	99	134	35	99	135	58	89
Set	101	68	97	110	149	55	121	150	70	106
Out	129	96	114	144	183	96	156	186	95	144
Nov	141	111	119	155	191	118	172	195	100	159
Dez	149	128	129	166	196	140	183	201	109	171
Total	1277	1035	1259	1489	1796	1006	1566	1837	983	1452

ESTACÃO : 02453003 - PALOTINA PERÍODO : 09/72 - 10/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	160	142	132	179	193	170	198	200	93	186
Fev	134	121	114	149	160	136	165	167	92	152
Mar	134	118	117	151	166	125	164	172	85	150
Abr	102	82	100	117	128	80	125	132	79	109
Mai	69	55	89	89	92	56	87	96	70	79
Jun	51	39	80	71	72	41	65	75	58	61
Jul	60	39	82	80	84	45	76	87	45	69
Ago	81	49	89	94	107	55	99	110	52	86
Set	103	66	97	106	130	66	123	132	65	102
Out	142	98	114	145	172	110	170	177	90	145
Nov	157	118	121	164	192	134	190	197	96	167
Dez	159	137	131	175	195	160	196	202	101	182
Total	1352	1064	1266	1520	1691	1178	1658	1747	926	1486

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02453023 - CASCAVEL

PERÍODO : 10/72 - 12/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	151	119	125	161	181	143	185	187	94	166
Fev	128	101	108	140	153	126	158	159	92	143
Mar	126	100	111	140	156	109	155	161	85	138
Abr	95	71	95	107	121	68	116	125	78	99
Mai	89	50	85	83	94	46	86	97	66	74
Jun	54	38	76	68	76	31	67	78	55	57
Jul	66	40	79	76	93	30	80	94	51	66
Ago	88	49	87	91	118	40	104	119	56	83
Set	105	60	93	103	135	58	125	137	62	101
Out	134	84	108	135	168	95	161	172	87	136
Nov	149	98	115	153	188	118	180	192	91	157
Dez	153	116	125	162	189	141	187	194	95	168
Total	1318	926	1207	1419	1672	1005	1604	1715	912	1388

ESTAÇÃO : 02453058 - TOLEDO

PERÍODO : 08/75 - 12/85

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	148	128	128	176	200	154	189	206	85	182
Fev	126	112	112	151	168	129	161	174	85	154
Mar	115	107	114	141	162	105	147	167	85	139
Abr	85	70	97	109	129	64	110	132	66	101
Mai	62	52	88	86	104	41	81	106	63	77
Jun	43	38	77	61	73	28	57	75	56	54
Jul	55	46	84	74	96	24	71	98	50	64
Ago	68	50	89	82	108	34	86	110	56	75
Set	82	68	96	95	128	53	103	129	67	94
Out	118	100	112	138	167	100	149	170	91	138
Nov	126	110	117	147	176	118	160	180	101	151
Dez	138	124	127	164	186	143	176	191	101	169
Total	1166	1005	1241	1424	1697	993	1490	1738	906	1388

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02454009 - GUAÍRA

PERÍODO : 02/63 - 12/86

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL						EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE		CRAE		PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	CRLE
Jan	149	145	132	178	197		165		187	201	94	94	183
Fev	124	127	115	149	163		140		157	169	94	94	154
Mar	119	121	118	148	160		126		152	167	82	82	148
Abr	87	79	99	115	122		83		113	128	60	60	108
Mai	59	57	90	87	88		57		79	91	64	64	76
Jun	44	41	81	68	70		39		58	71	58	58	58
Jul	53	44	85	78	87		40		69	88	46	46	67
Ago	68	53	91	87	105		47		87	107	49	49	80
Set	82	67	98	97	123		60		101	122	68	68	93
Out	116	98	114	139	161		109		145	162	95	95	137
Nov	134	118	121	159	184		133		169	186	90	90	161
Dez	145	139	131	172	194		157		182	197	107	107	178
Total	1180	1089	1275	1477	1654		1156		1499	1689	907	907	1443

ESTAÇÃO : 02548038 - MORRETES

PERÍODO : 01/61 - 10/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL						EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE		CRAE		PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	CRLE
Jan	124	132	129	139	151		134		153	156	117	117	147
Fev	107	118	113	123	130		125		133	136	116	116	132
Mar	97	113	115	115	119		116		122	125	111	111	122
Abr	70	82	98	88	89		81		88	93	76	76	89
Mai	54	61	90	75	74		59		70	77	64	64	70
Jun	40	44	80	60	60		46		52	63	57	57	56
Jul	42	42	83	62	62		48		55	65	51	51	58
Ago	53	49	88	69	74		62		68	76	52	52	71
Set	63	57	93	75	82		72		79	85	68	68	80
Out	88	80	108	99	111		99		110	114	82	82	108
Nov	106	99	116	117	130		113		130	134	84	84	124
Dez	118	124	128	129	143		128		145	148	101	101	138
Total	962	1001	1241	1151	1225		1083		1205	1272	979	979	1196

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02548039 - GUARAQUEÇABA PERÍODO : 11/77 - 10/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	PENMAN	CRLE
Jan	132	136	131	139	149	142	161	155	127	148	148
Fev	108	119	113	119	125	122	132	130	125	127	127
Mar	99	115	116	114	118	116	122	124	117	122	122
Abr	73	88	100	89	91	87	92	96	91	93	93
Mai	54	61	90	74	70	66	70	74	71	71	71
Jun	41	43	80	60	56	51	53	59	55	57	57
Jul	45	41	83	61	61	54	58	63	53	60	60
Ago	56	49	88	70	74	71	70	78	51	76	76
Set	69	56	93	77	83	79	85	87	70	84	84
Out	94	80	109	100	109	103	114	113	84	108	108
Nov	110	105	117	117	128	114	133	132	93	123	123
Dez	125	127	129	131	145	132	152	150	111	141	141
Total	1006	1020	1249	1151	1209	1136	1242	1261	1048	1210	1210

ESTAÇÃO : 02548055 - PARANAGUÁ PERÍODO : 01/61 - 12/85

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	PENMAN	CRLE
Jan	122	141	131	145	156	144	150	154	116	143	143
Fev	107	126	115	129	137	129	134	136	116	132	132
Mar	95	115	117	118	125	116	119	123	110	119	119
Abr	70	84	100	94	96	85	85	92	73	87	87
Mai	54	69	92	82	76	60	70	77	62	70	70
Jun	38	48	82	61	62	48	51	63	59	56	56
Jul	41	48	85	64	63	51	55	65	53	57	57
Ago	51	49	90	70	77	67	66	76	53	70	70
Set	61	57	95	76	83	77	80	86	67	79	79
Out	83	80	110	99	109	100	110	115	82	107	107
Nov	101	99	117	119	129	116	128	131	84	121	121
Dez	114	120	129	134	147	131	142	144	101	133	133
Total	937	1036	1263	1191	1260	1124	1190	1262	976	1174	1174

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02548070 - ANTONINA

PERÍODO : 11/77 - 10/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	129	135	130	136	145	140	157	151	122	146
Fev	109	114	112	119	125	123	134	131	124	128
Mar	99	113	115	114	118	116	122	124	120	122
Abr	73	84	99	89	90	87	91	94	91	92
Mai	57	61	90	75	69	69	73	73	70	68
Jun	43	43	80	61	58	48	55	61	56	56
Jul	47	42	82	62	60	52	60	63	52	59
Ago	56	47	88	71	73	69	70	77	54	74
Set	70	56	93	78	85	79	86	88	70	84
Out	94	81	109	101	111	104	115	115	87	110
Nov	106	103	117	115	124	112	129	128	100	120
Dez	120	124	128	129	142	130	145	147	113	138
Total	1003	1003	1243	1150	1200	1120	1237	1252	1059	1197

ESTAÇÃO : 02549006 - CURITIBA

PERÍODO : 03/51 - 08/89

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	118	101	117	138	145	134	152	151	84	143
Fev	99	90	102	118	125	117	128	131	80	125
Mar	91	85	104	111	115	106	118	121	75	115
Abr	66	61	87	87	88	74	86	92	56	85
Mai	48	48	79	73	72	49	66	75	46	65
Jun	36	36	71	58	58	35	50	60	47	50
Jul	42	38	75	65	67	36	57	69	43	55
Ago	58	46	81	77	85	50	76	87	43	71
Set	69	52	86	82	92	69	89	96	56	84
Out	88	68	98	102	112	98	113	116	65	109
Nov	104	80	105	120	131	117	133	136	65	127
Dez	114	93	115	131	142	132	146	148	79	140
Total	932	798	1120	1162	1232	1017	1214	1282	738	1169

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02549041 - PIRAQUARA

PERÍODO : 02/70 - 10/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	PENMAN	CRLE
Jan	124	99	116	134	135	131	157	142	82	157	139
Fev	97	99	101	113	116	112	124	122	77	124	119
Mar	90	85	103	106	106	103	115	112	74	115	110
Abr	66	61	87	83	76	73	85	81	53	85	79
Mai	48	47	79	68	61	52	64	65	49	64	61
Jun	39	38	71	58	52	38	52	54	45	52	48
Jul	45	37	74	63	59	38	59	62	43	62	52
Ago	58	44	79	73	72	54	74	76	42	74	67
Set	70	49	83	78	80	71	88	84	53	88	79
Out	94	64	97	102	107	101	119	112	62	119	108
Nov	107	77	103	117	121	117	136	128	62	136	124
Dez	115	93	114	123	130	126	144	136	75	144	133
Total	953	783	1107	1118	1115	1016	1217	1174	717	1217	1119

ESTAÇÃO : 02549091 - LAPA

PERÍODO : 09/88 - 10/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	PENMAN	CRLE
Jan	115	101	117	132	140	126	147	146	77	147	138
Fev	108	90	102	131	141	124	139	147	84	139	137
Mar	89	86	104	109	112	110	116	118	86	116	115
Abr	69	65	90	91	86	76	91	91	62	91	85
Mai	47	46	79	70	67	54	64	70	55	64	64
Jun	36	36	72	57	52	37	50	54	53	50	47
Jul	39	30	71	57	59	44	52	62	99	52	55
Ago	54	39	78	73	75	53	72	78	53	72	68
Set	69	47	85	81	89	74	89	93	53	89	85
Out	94	73	99	108	114	103	120	120	68	120	113
Nov	116	88	107	130	143	122	147	149	53	147	136
Dez	123	103	118	141	154	130	156	160	72	156	146
Total	959	807	1122	1180	1232	1053	1243	1288	755	1243	1189

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02550006 - IVAÍ

PERÍODO : 01/61 - 08/89

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL		EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	127	107	120	152	168	143	163	174	78	159
Fev	96	93	104	115	126	117	123	131	82	124
Mar	100	89	106	126	132	108	130	138	70	124
Abr	66	66	90	85	92	70	86	95	67	84
Mai	47	46	80	74	72	54	64	75	53	67
Jun	35	34	72	58	60	36	49	62	42	51
Jul	40	37	76	63	69	35	54	70	44	55
Ago	58	49	83	77	90	42	75	92	41	70
Set	71	51	89	86	105	57	90	107	59	84
Out	96	76	104	114	135	87	123	138	74	114
Nov	106	88	110	125	138	113	136	143	75	129
Dez	112	103	119	134	144	132	145	150	83	141
Total	954	839	1153	1209	1331	993	1238	1375	768	1202

ESTAÇÃO : 02550007 - IRATI

PERÍODO : 09/66 - 12/85

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL		EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	120	103	118	136	152	128	154	157	85	144
Fev	96	91	163	118	129	112	123	134	77	124
Mar	88	86	104	109	118	101	115	123	74	113
Abr	64	59	87	86	94	66	85	97	60	84
Mai	46	46	79	71	75	44	62	78	45	63
Jun	36	35	71	57	60	30	49	62	50	48
Jul	42	37	75	62	70	30	56	72	49	53
Ago	57	46	81	74	91	38	74	92	45	68
Set	71	52	86	82	103	56	90	104	60	82
Out	94	73	101	108	128	86	120	131	69	110
Nov	108	63	107	125	148	108	137	152	71	132
Dez	116	98	117	132	150	121	147	155	77	139
Total	938	809	1129	1160	1318	920	1212	1357	762	1160

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02550024 - VILA VELHA

PERÍODO : 01/54 - 10/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL					EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL		EVAP. DE LAGO CRLE
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	123	107	120	140	158	129	156	163	86	147
Fev	105	92	104	124	137	113	135	142	83	129
Mar	99	89	106	117	127	99	128	132	74	117
Abr	73	63	90	92	98	70	96	102	59	88
Mai	53	46	80	74	78	48	71	81	50	67
Jun	42	37	73	61	65	31	57	67	49	51
Jul	49	38	76	69	77	33	66	79	42	59
Ago	66	47	83	83	98	45	85	101	46	76
Set	78	55	89	89	106	62	100	109	59	88
Out	106	72	102	116	135	97	135	139	70	120
Nov	119	87	109	133	157	113	151	161	67	139
Dez	123	102	119	135	158	115	155	162	79	139
Total	1036	835	1151	1233	1394	955	1335	1438	764	1220

ESTAÇÃO : 02550025 - TEIXEIRA SOARES

PERÍODO : 01/63 - 09/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL					EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL		EVAP. DE LAGO CRLE
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	123	105	118	136	147	134	154	153	85	144
Fev	106	91	103	121	128	118	134	134	81	127
Mar	97	87	105	114	117	108	122	123	75	117
Abr	69	62	88	86	89	74	88	93	60	85
Mai	50	45	79	69	67	50	65	71	50	62
Jun	39	35	71	57	54	36	51	57	49	48
Jul	46	36	74	63	64	37	59	66	44	54
Ago	62	44	81	76	84	50	78	87	45	71
Set	76	53	86	85	98	68	94	101	57	86
Out	103	71	101	111	124	102	128	129	70	116
Nov	116	85	107	127	144	120	144	149	73	135
Dez	120	99	118	127	144	123	148	148	79	136
Total	1007	813	1131	1172	1260	1020	1265	1311	768	1181

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02551006 - GUARAPUAVA PERÍODO : 01/51 - 05/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	CRLE
Jan	123	163	117	143	157	136	158	163	86	86	151
Fev	96	83	102	123	131	116	125	137	84	84	127
Mar	95	85	103	117	123	101	123	129	77	77	117
Abr	68	62	87	92	102	70	90	106	62	62	90
Mai	51	46	79	73	76	47	67	79	52	52	65
Jun	36	32	70	58	61	33	49	63	53	53	50
Jul	43	37	74	68	76	34	59	78	49	49	59
Ago	59	46	82	82	91	49	78	94	51	51	75
Set	72	49	86	88	100	65	93	103	64	64	86
Out	98	72	100	116	131	101	127	136	73	73	120
Nov	110	80	106	131	148	118	141	153	77	77	137
Dez	117	96	116	137	153	128	151	159	86	86	144
Total	968	801	1122	1228	1349	988	1261	1400	814	814	1221

ESTAÇÃO : 02551010 - GUARAPUAVA PERÍODO : 07/73 - 10/92

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	CRLE
Jan	126	105	118	147	161	142	162	167	85	85	156
Fev	106	89	102	126	136	122	137	142	80	80	133
Mar	101	86	104	124	129	111	131	135	78	78	124
Abr	71	62	88	95	96	76	95	101	66	66	91
Mai	49	44	78	74	74	52	67	77	58	58	67
Jun	38	34	70	61	61	34	52	64	49	49	51
Jul	45	35	74	68	72	38	62	75	48	48	69
Ago	63	44	89	84	95	51	83	98	49	49	78
Set	78	51	85	93	109	70	101	113	58	58	83
Out	105	73	101	123	140	107	135	145	74	74	128
Nov	118	85	107	135	155	121	150	160	76	76	142
Dez	124	100	117	143	158	135	159	164	83	83	150
Total	1024	808	1124	1273	1386	1059	1334	1441	804	804	1272

## VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTACÃO : 02552009 - LARANJEIRAS DO SUL PERÍODO : 10/73 - 10/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL		EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	GRAE	GRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	146	115	124	157	183	137	179	188	91	164
Fev	120	96	106	134	150	118	149	155	93	137
Mar	117	95	109	133	148	105	145	154	78	131
Abr	83	66	92	100	110	67	104	114	72	93
Mai	62	48	83	81	91	44	78	94	60	72
Jun	49	37	74	66	76	26	61	78	55	55
Jul	60	40	79	75	93	27	73	95	52	65
Ago	80	49	86	90	119	36	97	120	58	82
Set	97	57	91	100	132	56	116	134	61	98
Out	123	81	106	131	161	96	150	165	85	133
Nov	133	94	113	140	169	110	162	173	85	143
Dez	143	110	123	153	179	129	176	184	90	158
Total	1213	888	1186	1360	1611	960	1490	1654	880	1331

ESTACÃO : 02553015 - PLANALTO PERÍODO : 03/73 - 09/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL		EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	GRAE	GRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	169	146	133	183	222	146	204	227	100	188
Fev	134	120	114	153	182	125	164	187	94	157
Mar	135	118	117	151	180	107	164	184	84	148
Abr	95	79	99	111	133	62	116	135	84	102
Mai	69	53	88	85	102	37	84	104	68	74
Jun	53	39	79	67	80	25	65	83	64	56
Jul	65	43	83	76	100	22	77	104	55	65
Ago	83	55	91	92	126	31	98	127	65	83
Set	106	66	97	109	151	50	124	151	70	104
Out	140	97	114	146	189	94	167	191	95	146
Nov	150	116	121	160	208	120	181	211	92	168
Dez	175	142	133	183	227	141	211	232	105	188
Total	1374	1074	1269	1516	1900	960	1655	1936	976	1479

VALORES MENSIAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02553018 - USINA DE SALTO OSÓRIO PERÍODO : 07/72 - 09/92

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO CRLE
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	152	133	129	162	187	136	184	192	97	166
Fev	121	110	111	134	149	114	148	154	97	136
Mar	119	107	114	134	147	104	146	152	87	130
Abr	85	72	96	99	107	65	105	111	81	96
Mai	61	50	86	76	84	44	76	86	63	67
Jun	48	37	77	60	65	29	58	67	61	50
Jul	60	41	81	68	83	25	71	84	57	57
Ago	77	51	88	85	107	38	92	108	61	76
Set	97	63	95	101	131	55	115	133	67	97
Out	124	89	111	129	159	89	148	162	91	128
Nov	140	106	117	147	176	112	169	180	97	148
Dez	152	128	129	162	189	133	185	194	98	164
Total	1236	986	1234	1357	1584	944	1497	1623	967	1307

ESTAÇÃO : 02554004 - FOZ DO IGUAÇU PERÍODO : 01/51 - 04/81

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO CRLE
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	146	147	133	177	198	160	187	205	105	183
Fev	120	128	115	148	162	137	153	169	101	153
Mar	110	113	116	140	146	125	142	153	99	140
Abr	76	78	97	103	105	83	101	110	77	99
Mai	51	51	87	81	72	58	69	76	62	70
Jun	37	37	78	62	58	42	51	61	65	53
Jul	42	38	81	69	67	42	58	70	55	58
Ago	58	48	89	83	88	59	77	92	57	78
Set	75	63	98	95	110	73	97	113	76	95
Out	108	92	112	134	150	108	138	155	98	133
Nov	131	113	120	161	184	136	167	190	86	164
Dez	145	139	133	176	201	157	184	207	101	183
Total	1099	1047	1257	1429	1541	1180	1424	1601	982	1409

**VALORES MENSAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)**

**ESTAÇÃO : 02554026 - SÃO MIGUEL DO IGUAÇU PERÍODO : 08/82 - 10/92**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	182	151	134	187	214	165	218	221	97	194
Fev	142	123	114	154	172	136	172	178	92	159
Mar	130	120	118	150	169	118	158	175	92	149
Abr	87	81	100	104	110	76	108	114	93	97
Mai	62	53	88	80	84	56	77	87	66	74
Jun	48	38	79	64	66	35	60	68	62	54
Jul	58	37	81	72	82	36	70	83	51	63
Ago	79	48	89	90	109	45	94	111	52	81
Set	110	65	97	107	138	61	128	140	65	104
Out	141	98	115	147	179	106	169	183	100	147
Nov	149	121	122	168	203	132	180	207	97	171
Dez	174	147	134	187	220	157	210	226	88	192
Total	1362	1082	1271	1510	1746	1123	1644	1793	965	1485

**ESTAÇÃO : 02649021 - RIO NEGRO PERÍODO : 01/61 - 05/81**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	115	106	118	135	147	133	148	153	80	143
Fev	101	92	102	121	127	115	130	133	86	125
Mar	89	89	104	110	116	104	115	121	78	114
Abr	61	61	87	82	87	67	81	91	47	81
Mai	42	45	77	63	65	49	57	68	46	60
Jun	33	36	70	53	53	33	45	55	47	46
Jul	38	37	73	60	59	33	52	61	42	49
Ago	51	42	79	69	74	47	68	76	48	64
Set	64	52	86	77	86	67	82	89	57	79
Out	86	70	99	102	115	98	111	120	66	110
Nov	107	81	106	124	141	119	137	146	65	134
Dez	116	99	117	135	149	128	148	154	78	142
Total	903	809	1118	1131	1219	993	1174	1267	740	1147

## VALORES MENSIAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02651006 - PALMAS PERÍODO : 01/61 - 04/85

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	112	95	114	134	146	132	146	152	70	143
Fev	92	85	99	111	122	110	120	127	78	120
Mar	83	81	100	105	109	95	109	114	72	107
Abr	60	53	83	86	84	71	82	89	54	83
Mai	40	40	73	69	60	49	57	64	47	59
Jun	28	31	68	52	45	37	42	48	47	44
Jul	32	32	69	59	50	42	47	53	44	50
Ago	46	41	75	69	71	54	64	75	48	67
Set	60	48	82	76	84	64	79	86	57	77
Out	87	68	96	109	115	104	115	121	63	114
Nov	102	82	103	124	137	121	133	142	58	133
Dez	117	95	114	141	158	135	152	163	74	150
Total	859	751	1074	1135	1181	1014	1146	1234	712	1147

ESTAÇÃO : 02651007 - PORTO UNIÃO PERÍODO : 01/61 - 12/78

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	110	112	121	128	142	121	141	147	83	134
Fev	98	98	106	117	129	106	126	133	83	120
Mar	86	93	106	106	115	99	111	119	84	110
Abr	62	59	88	84	88	66	82	92	55	81
Mai	42	41	79	62	63	49	57	66	48	59
Jun	31	33	69	47	48	38	42	50	50	45
Jul	34	33	73	51	51	38	46	53	48	47
Ago	48	40	79	63	72	45	62	73	49	61
Set	64	53	87	78	91	63	82	94	64	80
Out	90	72	102	105	127	84	114	130	72	109
Nov	110	87	110	125	154	101	139	157	76	131
Dez	121	109	121	140	161	119	154	165	88	143
Total	896	830	1140	1106	1241	929	1156	1279	800	1120

**VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)**

**PERÍODO : 01/79 - 10/92**

**ESTAÇÃO : 02651043 - PALMAS**

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAPOT. REAL			EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO			
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	GRAE	PENMAN	CRLE	TURC	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	124	103	117	121	133	98	147	137	85	147	137	85	118
Fev	94	87	101	107	107	83	112	110	85	112	110	85	97
Mar	90	84	102	97	103	74	108	106	72	108	106	72	91
Abr	63	60	86	68	67	50	75	69	69	75	69	69	61
Mai	48	41	76	54	52	36	58	53	56	58	53	56	46
Jun	42	33	68	46	43	23	50	44	51	50	44	51	35
Jul	52	32	70	51	54	26	61	55	45	61	55	45	43
Ago	64	42	78	65	72	36	77	73	52	77	73	52	57
Set	83	47	83	75	86	50	99	87	55	99	87	55	71
Out	106	70	99	103	118	79	127	121	72	127	121	72	102
Nov	115	82	106	117	133	94	138	136	74	138	136	74	117
Dez	118	99	117	123	138	97	142	141	82	142	141	82	120
Total	999	780	1103	1021	1106	746	1194	1132	798	1194	1132	798	958

**PERÍODO : 05/81 - 05/93**

**ESTAÇÃO : 02651046 - USINA FOZ DO AREIA**

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAPOT. REAL			EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO			
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	GRAE	PENMAN	CRLE	TURC	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE
Jan	135	116	124	160	181	140	173	187	84	173	187	84	164
Fev	95	97	105	112	122	103	122	127	96	122	127	96	116
Mar	85	90	108	103	110	82	108	114	76	108	114	76	99
Abr	62	64	92	81	89	74	82	92	76	82	92	76	84
Mai	43	46	81	60	64	52	57	66	61	57	66	61	60
Jun	32	34	72	49	51	37	44	53	54	44	53	54	46
Jul	38	35	74	55	61	34	50	62	47	50	62	47	50
Ago	54	43	81	70	89	44	70	82	47	70	82	47	65
Set	73	52	88	86	104	57	93	106	59	93	106	59	84
Out	99	77	104	116	138	90	126	142	78	126	142	78	118
Nov	111	90	112	129	150	113	142	154	90	142	154	90	135
Dez	123	110	122	145	167	125	157	172	91	157	172	91	149
Total	950	854	1163	1166	1317	951	1224	1357	859	1224	1357	859	1170

**VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)**

**ESTAÇÃO : 02652003 - CLEVELÂNDIA PERÍODO : 12/72 - 10/92**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	CRLE
Jan	146	107	120	154	170	140	180	177	84	84	160
Fev	117	91	103	129	135	117	146	141	84	84	131
Mar	113	88	105	127	134	106	141	140	72	72	125
Abr	81	62	88	93	98	67	101	102	68	68	87
Mai	58	43	78	73	78	45	73	81	58	58	65
Jun	47	33	70	60	63	27	59	65	54	54	49
Jul	57	35	74	65	75	27	70	76	51	51	55
Ago	74	44	81	78	94	40	89	96	55	55	71
Set	90	51	86	90	108	60	109	110	60	60	87
Out	120	73	102	121	145	97	145	149	76	76	125
Nov	138	86	108	141	165	120	168	170	82	82	147
Dez	147	103	120	152	172	135	180	178	85	85	157
Total	1188	816	1135	1283	1437	981	1461	1484	829	829	1259

**ESTAÇÃO : 02652035 - PATO BRANCO PERÍODO : 01/79 - 10/92**

MÊS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL				EVAPOT. REAL		EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO	
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	CRLE	CRLE
Jan	159	117	124	173	197	152	195	203	85	85	179
Fev	127	98	107	140	153	125	157	159	94	94	143
Mar	128	96	109	142	158	109	158	164	73	73	139
Abr	85	68	93	100	108	69	106	112	78	78	93
Mai	60	46	82	77	84	45	76	86	61	61	69
Jun	47	35	73	62	69	27	59	71	55	55	52
Jul	59	36	77	70	85	27	72	87	51	51	60
Ago	78	48	85	87	110	39	96	112	57	57	79
Set	99	55	90	102	132	60	119	134	65	65	100
Out	126	81	107	134	165	97	154	169	86	86	136
Nov	143	96	114	152	183	121	176	187	87	87	156
Dez	152	114	125	166	194	141	188	199	94	94	171
Total	1263	890	1186	1405	1638	1012	1555	1683	886	886	1377

VALORES MENSIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO (mm)

ESTAÇÃO : 02653012 - FRANCISCO BELTRÃO PERÍODO : 03/63 - 02/94

MÉS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL			EVAPOT. REAL			EVAPORAÇÃO POTENCIAL			EVAP. DE LAGO
	PENMAN	THORNT	BLANEY	HARGRE	CRAE	CRAE	PENMAN	CRLE	TURC	
Jan	150	126	127	168	196	144	185	201	90	174
Fev	122	105	109	142	157	124	153	162	97	144
Mar	119	101	111	141	155	110	149	160	81	138
Abr	80	67	93	99	110	66	100	113	73	92
Mai	53	45	82	76	83	45	69	86	61	68
Jun	42	33	73	61	64	29	54	66	55	50
Jul	51	36	77	69	80	28	66	82	50	58
Ago	69	46	85	84	104	40	85	105	58	76
Set	90	57	91	98	125	58	109	127	65	95
Out	123	84	108	135	166	97	150	170	88	136
Nov	139	100	115	154	185	121	171	189	91	157
Dez	152	122	127	167	198	138	187	203	93	172
Total	1190	922	1198	1394	1623	999	1477	1664	902	1360

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ALLEN, Richard G. A Penman for all seasons. J. of Irrigation and Drainage Engineering, v. 112, n. 4, p. 348 - 369, Nov. 1986.
- 2 ANTUNES JR, Antônio; ANTUNES, José. Biologia: botânica, zoologia e biologia geral. São Paulo: Ed. Nacional, 1967. cap 9.
- 3 ARAÚJO FILHO, Paulo F. de et al. Utilização da estimativa da evapotranspiração potencial pelo método de Hargreaves para o Estado de Pernambuco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS (10.: 1993: Gramado) Anais. Rio de Janeiro: ABRH, 1993. v. 2, p. 380 - 387.
- 4 ÁVILA, Walfrido V. et al. Projeto HG-70. Métodos de regionalização para cálculo da evaporação líquida: relatório de apresentação, Curitiba: COPEL, 1991.
- 5 BARTH, Flávio T. Fundamentos para gestão de recursos hídricos. In: MODELOS de gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel: ABRH, 1987. cap. 1. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos).

- 6 BELTRAME, L. F. S.; FIETZ, C. R. Análise comparativa de modelos de estimativa da radiação líquida. RBE. Caderno de Recursos Hídricos, v. 4, n. 2, p. 19 - 30, Nov. 1986.
- 7 BELTRAME, Lawson F. S. et al. Análise comparativa do procedimento de cálculo da evapotranspiração potencial pelo uso do método combinado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (4.: 1981: Fortaleza) Anais. São Paulo: ABRH, 1981. v. 3, p. 237 - 248.
- 8 BERLATO, Moacir A.; MOLION, Luiz C. B. Evaporação e evapotranspiração. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 95 p. (Boletim Técnico n. 7).
- 9 BRAGA JR, B. P. F.; CONEJO, J. G. L.; PALOS, J. C. F. Balanço Hídrico do Estado de São Paulo. Montevideo: Unesco, 1991. 87 p.
- 10 BRASIL. Escritório de Meteorologia. Ministério da Agricultura. Normais Climatológicas. Rio de Janeiro, 1969, v. 1-5, 316 p.
- 11 ———. Departamento Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Normais Climatológicas. Brasília, 1992, 84 p.

- 12 ———. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Coordenação Geral de Recursos Hídricos. Disponibilidade hídrica do Brasil. Brasília, 1992, 1 mapa: color.; 43 x 62 cm. Escala 1:13 000 000.
- 13 BRUTSAERT, Wilfried. Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publ. 1982. 299 p.
- 14 CANAMBRA ENGINEERING CONSULTANTS. Power study of South Brazil, Rio de Janeiro, 1968, app. X, p. X-6.
- 15 CHOW, Ven Te. Handbook of applied hydrology: a compendium of water resources technology. New York: McGraw - Hill, 1964. 1 v.
- 16 COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Superintendência de Operação Energética. Comparações entre o modelo de Morton e o tanque classe A para estimativa da evaporação do reservatório de Três Marias. Belo Horizonte, 1991. (Nota Técnica OP/PE2 - 09/91).
- 17 ———. Evaporação de lago em Minas Gerais. Belo Horizonte, 1992. (Nota Técnica OP/PE2 - 03/92).

- 18 DAKER, Alberto. A água na agricultura: manual de hidráulica agrícola: irrigação e drenagem. Rio de Janeiro: F. Bastos, 1960, v. 3, p. 42-50.
- 19 DIAS, Nelson L. da C. Estimativas climatológicas de evaporação em lagos. Rio de Janeiro: COPPE, 1986. Dissertação (Mestrado). UFRJ. 175 p.
- 20 DIAS, Nelson L. da C.; KELMAN, Jerson. Comparação entre modelos climatológicos e o uso de tanques classe A para estimar a evaporação no reservatório de Sobradinho. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (7.: 1987: Salvador) Anais. Curitiba: ABRH, 1987. v. 2, p. 162-169.
- 21 DIAS, Nelson L. da C.; KELMAN, Jerson; DAMÁZIO, Jorge M. Métodos para a estimação da evaporação em lagos. Rio de Janeiro: [s.n., s.d.], 12 p. Datilografado.
- 22 DORFMAN, Raul. Avaliação de critérios para a seleção de um método adequado de cálculo da evapotranspiração. Revista de Hidrologia e Recursos Hídricos, v.2, n. 1, p. 1 - 104, Jan/jun. 1980.
- 23 FRERE, Michel. A method for the practical application of the Penman formula for the estimation of potential evapotranspiration and evaporation from a free water surface. [S. l]: FAO, 1979. 26 p.

- 24 GEIGER, Rudolf. Manual de microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1961. 595 p. cap. 1.
- 25 GRANGER, R. J. A complementary relationship approach for evaporation from nonsaturated surfaces. J. of Hydrology, v. 111, n. 1/4, p. 31 - 38, Nov. 1989.
- 26 HARGREAVES, George H.; SAMANI, Zohrab A. Estimating potential evapotranspiration. J. of the Irrigation and Drainage Division, v. 108, n. 3, p. 225-230, Sept. 1982.
- 27 ILLICH, Ingrid. Projeto HG-70. Métodos de regionalização para cálculo da evaporação líquida: relatório de progresso n. 3. Curitiba, CEHPAR, 1992.
- 28 ———. Projeto HG-70. Métodos de regionalização para cálculo da evaporação líquida: relatório de progresso n. 4. Curitiba, CEHPAR, 1993.
- 29 KAVISKI, Eloy; KRÜGER, Cláudio M. Abordagem sistemática para o mapeamento regional de grandezas meteorológicas e traçado de mapas de isolinhas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS (10.: 1993: Gramado) Anais. Rio de Janeiro: ABRH, 1993. v. 3, p. 453 - 462.

- 30 KOCH, Ubald; RÊGO, Janiro C. Aplicação de testes não-paramétricos para verificar a homogeneidade de séries hidrometeorológicas. RBE. Caderno de Recursos Hídricos, v. 3, n. 1, p. 47 - 75, Maio 1985.
- 31 LENCASTRE, A.; FRANCO, F. M. Lições de hidrologia. Lisboa: Univ. Nova de Lisboa, 1984. 451 p.
- 32 LINSLEY JR., Ray K.; KOHLER, Max A.; PAULHUS, Joseph L. H. Hydrology for engineers. SI Metric ed. London: McGraw-Hill, 1988. 492 p.
- 33 MARQUES, J.; SALATI, E.; SANTOS, J. M. dos. Cálculo da evapotranspiração real na bacia amazônica através do método aerológico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA (3.: 1979: Brasília) Anais. Brasília: DNAEE, 1979. v. 1, p. 193 - 198.
- 34 MARQUES FILHO, Ari de O.; RIBEIRO, Maria de N. G.; SALATI, Enéas. Evapotranspiração de florestas da região amazônica. Acta Amazônica, v. 13, n. 3/4, p. 519 - 529, Jul. 1983.
- 35 MATEUS, Armando S.; DUARTE, Evandro F. Estudo comparativo da evaporação potencial estimada por evaporímetros dos tipos classe A e OMM de 20 m<sup>2</sup>, na bacia representativa da

- Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (4.: 1981: Fortaleza) Anais. São Paulo: ABRH, 1981. v. 3, p. 249 - 280.
- 36 MATTOS, Arthur. Evapotranspiração real, como determiná-la para estudos hidrológicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS (9.: 1991: Rio de Janeiro) Anais. São Paulo: ABRH, 1991. v. 1, p. 168 - 177.
- 37 MATTOS, A.; VILLELA, S. M. Evapotranspiração real média espacial em uma bacia hidrográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (7.: 1987: Salvador) Anais. Curitiba: ABRH, 1987. v. 2, p. 204 - 220.
- 38 MOLLE, François. Evapotranspiração - evaporação do tanque classe A - evaporação nos pequenos açudes: variações e correlações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS (8.: 1989: Foz do Iguaçu) Anais. Rio de Janeiro: ABRH, 1989. v. 1, p. 282 - 293.
- 39 MORTON, Fred I. Climatological estimates of evapotranspiration. J. of the Hydraulics Division, v. 102, n. HY3, p. 275 - 291, Nov. 1976.
- 40 ———. Estimating evapotranspiration from potential evaporation: practicality of an iconoclastic approach. J. of Hydrology, v. 38, n. 1/2, p. 1 - 32, Jan. 1978.

- 41 ———. Climatological estimates of lake evaporation. Water Resources Research, v. 15, n. 1, p. 64 - 76, Feb. 1979.
- 42 ———. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. J. of Hydrology, v. 66, n. 1/4, p. 1 - 76, Oct. 1983a.
- 43 ———. Operational estimates of lake evaporation. J. of Hydrology, v. 66, n. 1/4, p. 77 - 100, Oct. 1983b.
- 44 ———. Practical estimates of lake evaporation. J. of Climate and Applied Meteorology, v. 25, p. 371 - 387, Mar. 1986.
- 45 MOTA, F. S. da; OLIVEIRA, M. O. de; BEIRSDORF, M. I. C. Normais mensais e anuais (1931-60) da evapotranspiração potencial segundo Penman no Brasil e sua comparação com os valores segundo Thornthwaite. Boletim Técnico Instituto Nacional de Meteorologia, n. 16, p. 11 - 21, 1978.
- 46 OLIVEIRA, M. O. de; MOTA, F. S. da; SILVA, J. B. da. Estimates of potential evapotranspiration (Penman) as a function of geographical factors in Brazil. Agricultural Meteorology, v. 22, n. 3-4, p. 207 - 215, Dec. 1980.

- 47 PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proceedings of Royal Society, Serie A, v. 193, n. 1032, p. 120 - 145, 1948.
- 48 PINTO, Nelson L. de S. et al. Hidrologia básica. São Paulo: E. Blücher, 1976. cap. 5.
- 49 RAUDKIVI, Arved J. Hydrology: an advanced introduction to hydrological processes and modelling. New York: Pergamon, 1979. cap. 4.
- 50 SANTOS, Odete. Estimativa da evapotranspiração da bacia amazônica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA (3.: 1979: Brasília) Anais. Brasília: DNAEE, 1979. v. 1, p. 212 - 229.
- 51 SILVA, Wilson Jesus da et al. Estimativa da evaporação potencial, em condições de campo, usando o tanque classe A modificado. Revista Ceres, v. 27, n. 151, p. 291-301, 1980.
- 52 SNEDECOR, George W.; COCHRAN, William G. Statistical methods. 6.ed. Ames: The Iowa State University Press. 1967. cap. 5.

- 53 SOLOMON, S. I.; GUPTA, S. K. Distributed numerical model for estimating runoff and sediment discharge of ungaged rivers: model development. Water Resources Research, v. 13, n. 3, p. 619 - 629, June 1977.
- 54 SUGAI, Martha R. v. B.; GUGELMIN, José A. Análise dos valores de evaporação líquida na bacia incremental entre Foz do Areia e União da Vitória. Curitiba: Copel, 1990. 16 p. ( Relatório Técnico SPE/VHID 012/90 ).
- 55 TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. A first course in turbulence. Cambridge: MIT, 1972. 300 p.
- 56 TROVATI, Luiz Roberto. Estimativa da evaporação do Lago de Ilha Solteira através do modelo de relação complementar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (7.: 1987: Salvador) Anais. Curitiba: ABRH, 1987. v. 2, p. 193 - 202.
- 57 UNESCO. Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Montevideo: ROSTLAC, 1982. 130 p.
- 58 VILLA NOVA, N. A.; OMETTO, J. C. Adaptação e simplificação do método de Penman às condições climáticas do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (4.: 1981: Fortaleza) Anais. São Paulo: ABRH, 1981. v. 3, p. 281 - 299.

- 59 VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K. Evaporação e evapotranspiração. In: ENGENHARIA hidrológica. Rio de Janeiro: ABRH: UFRJ, 1989. cap. 3. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v. 2).
- 60 WILSON, E. M. Engineering hydrology. 3 ed. London: MacMillan, 1983. 309 p.
- 61 WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. Geneva: WMO, 1966. 121 p. (Technical Note n. 83).