PATRICK VALVERDE MEDEIROS

Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de estimativas de nove equações empírico-teóricas com base na equação de Penman-Monteith

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil - Hidráulica e Saneamento.

Área de concentração: Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Edson Cezar Wendland

São Carlos

2008

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Medeiros, Patrick Valverde

M488a Análise da evapotranspiração de referência de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de estimativas de nove equações empírico-teóricas com base na equação de Penman-Monteith / Patrick Valverde Medeiros ; orientador Edson Cezar Wendland. -- São Carlos, 2008.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008.

1. Balanço hídrico 2. Lisímetro. 3. Evapotranspirômetro. 4. Penman-Monteith.
5. Auto-regressão. 6. Regressão linear. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PATRICK VALVERDE MEDEIROS**

Dissertação defendida e julgada em 24/04/2008 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **EDSON CEZAR WENDLAND (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **CLOVIS ALBERTO VOLPE**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP-Campus de Jaboticabal)

Aprovado

Prof. Associado **MARCELO ZAIAT**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento)

Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

“Faz subir os vapores das extremidades da terra; faz os relâmpagos para a chuva; tira os ventos dos seus tesouros.”

Salmos 135:7

“Fazendo Ele soar a sua voz, logo há rumor de águas no céu, e faz subir os vapores da extremidade da terra; faz os relâmpagos para a chuva, e dos seus tesouros faz sair o vento.”

Jeremias 10:13

“Eis que Deus é grande, e nós não o compreendemos, e o número dos seus anos não se pode esquadriñar. Porque faz miúdas as gotas das águas que, do seu vapor, derramam a chuva, a qual as nuvens destilam e gotejam sobre o homem abundantemente.”

Jó 36:26-28

“Todos os rios vão para o mar, e, contudo, o mar não se enche; ao lugar para onde os rios vão, para ali tornam eles a correr.”

Eclesiastes 1:7

“Porque, assim como desce a chuva e a neve dos céus, e para lá não tornam, mas regam a terra, e a fazem produzir, e brotar, e dar semente ao semeador, e pão ao que come.”

Isaias 55:10

“Pelos teus mandamentos alcancei entendimento; por isso odeio todo falso caminho. Lâmpada para os meus pés é tua palavra, e luz para o meu caminho.”

Salmo 119:104-105

Dedico este trabalho à minha família, meu maior incentivo e apoio. Especialmente meus pais, os maiores exemplos que tenho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em quem ponho minha fé e que é luz no meu caminho.

À minha família, pelo apoio sempre presente, aos meus pais (Gilmar Cândido Medeiros e Nádia Maria Valverde Medeiros), pelas palavras sábias nos momentos mais importantes e pelo apoio à minha fé. Agradecimento especial também ao meu irmão (Ronan Valverde Medeiros), amigo e companheiro pra toda hora.

Ao Professor Edson C. Wendland, pelo apoio, cobrança e orientação indispensáveis ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Clóvis A. Volpe, pela grande colaboração de forma totalmente espontânea ao meu trabalho, pela boa orientação e pelo fornecimento dos dados, sem os quais não seria possível completar esta obra.

Ao Professor Marinho Gomes de Andrade Filho, pelas sugestões dadas a este trabalho, que foi boa contribuição para a conclusão do mesmo.

À igreja Metodista em São Carlos, comunidade de fé que me acolheu e apoiou, mas principalmente aos amigos e amigas que lá fiz, irmãos na fé que levarei no coração por onde eu for. À Rev. Olívia Regina de Lima Freitas e ao Rev. Jorge Wagner de Campos Freitas, pelo exemplo de fé e dedicação à obra de Deus.

Aos amigos de república (Aníbal da Fonseca Santiago, César “Neyzão” Sperchi Henrique, Diego “Dibeatles” Botelho Ruas e Eduardo “Curió” Rocha Santos), pelos bons momentos de conversa sobre o futuro e incentivo em todas as fases deste trabalho, e pelos momentos de diversão e entretenimento.

Aos colegas de turma de mestrado, pelo companheirismo e momentos de descontração e aos colegas do LHC (não cito nomes para não deixar ninguém de fora), pela boa convivência e pelo apoio técnico quando necessário.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade do curso de mestrado.

Ao Institute for Technologies in the Tropics (ITT) da Alemanha, por proporcionar o intercambio com a Escuela de Agronomia de la Pontificia Universidad Católica de Valparaiso – Chile. Agradecimentos também ao Professor Eduardo Salgado, pela orientação em minha estadia no Chile.

A todos os amigos que fiz no Chile, que me proporcionaram momentos inesquecíveis.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil, pela concessão da minha bolsa de estudos.

RESUMO

MEDEIROS, P.V. **Análise da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e ajuste estatístico de estimativas de nove equações empírico-teóricas com base na equação de Penman-Monteith.** 2008. 241f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

A quantificação da evapotranspiração é uma tarefa essencial para a determinação do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica e para o estabelecimento do déficit hídrico de uma cultura. Nesse sentido, o presente trabalho aborda a análise da evapotranspiração de referência (*ET_o*) para a região de Jaboticabal-SP. O comportamento do fenômeno na região foi estudado a partir da interpretação de dados de uma bateria de 12 lisímetros de drenagem (*ET_{oLis}*) e estimativas teóricas por 10 equações diferentes disponíveis na literatura. A análise estatística de correlação indica que as estimativas da *ET_o* por equações teóricas comparadas à *ET_{oLis}* medida em lisímetro de drenagem não apresentaram bons índices de comparação e erro. Admitindo que a operação dos lisímetros não permitiu a determinação da *ET_o* com boa confiabilidade, propôs-se um ajuste local das demais metodologias de estimativa da *ET_o*, através de auto-regressão (*AR*) dos ruídos destas equações em comparação com uma média anual estimada pela equação de Penman-Monteith (*ET_{oPM}*), tomada como padrão, em períodos quinzenal e mensal. O ajuste através de regressão linear simples também foi analisado. Os resultados obtidos indicam que a radiação efetiva é a variável climática de maior importância para o estabelecimento da *ET_o* na região. A estimativa pela equação de Penman-Monteith apresentou excelente concordância com as equações de Makkink (1957) e do Balanço de Energia. Os ajustes locais propostos apresentaram excelentes resultados para a maioria das equações testadas, dando-se destaque às equações da Radiação Solar FAO-24, de Makkink (1957), de Jensen-Haise (1963), de Camargo (1971), do Balanço de Radiação, de

Turc (1961) e de Thornthwaite (1948). O ajuste por regressão linear simples é de mais fácil execução e apresentou excelentes resultados.

Palavras-Chave: Lisímetro, Evapotranspirômetro, Penman-Monteith, Auto-Regressão, Regressão Linear.

ABSTRACT

MEDEIROS, P.V. **Analysis of the reference evapotranspiration from lysimetric data and statistical tuning of nine empiric equations based on the Penman-Monteith equation.** 2008. 241f. Dissertation (Master of Science in Hydraulics and Sanitary Engineering). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

The quantification of the evapotranspiration is an essential task for the determination of the water balance in a watershed and for the establishment of the culture's water deficit. Therefore, the present work describes the analysis of the reference evapotranspiration (ET_o) for the region of Jaboticabal-SP. The phenomenon behavior in the region was studied based on the interpretation of 12 drainage lysimeters data (ET_{oLis}) and on theoretical estimates for 10 different equations available in the Literature. An statistical analysis indicated that the theoretical ET_o estimates compared with the ET_{oLis} did not present good indices of comparison and error. Admitting that the lysimeters operation did not allow a reliable ET_o determination, a local adjustment of the theoretical methodologies for ET_o estimate was considered. An auto-regression (AR) of the noises of these equations in comparison with the annual average estimate for the Penman-Monteith equation (ET_{oPM}), taken as standard, has been performed in fortnightly and monthly periods. The adjustment through simple linear regression has also been analyzed. The obtained results indicate that the effective radiation is the most important climatic variable for the establishment of the ET_o in the region. The Penman-Monteith estimate presented excellent correlation to the estimates by Makkink (1957) equation and the Energy Balance. The local adjustments presented excellent results for the majority of the tested equations, specially for the Solar Radiation FAO-24, Makkink (1957), Jensen-Haise (1963), Camargo (1971), Radiation Balance, Turc (1961) and

Thornthwaite (1948) equations. The adjustment by simple linear regression is of easier execution and also presented excellent results.

Key-words: Lysimeter, Evapotranspirometer, Penman-Monteith, Auto-Regression, Linear Regression.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01. Esquematização de um lisímetro de drenagem livre.....	52
Figura 02. <i>FAC</i> para um processo $AR(1)$ (Amortecimento exponencial).	69
Figura 03. <i>FAC</i> para um processo $AR(1)$ (Senóide Amortecida).	69
Figura 04. Estação Agroclimatológica da área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP de Jaboticabal-SP.	71
Figura 05. Lisímetros drenagem livre por gravidade.	73
Figura 06. Lisímetros com vista parcial da Estação Agroclimatológica FCAV/UNESP de Jaboticabal-SP.	74
Figura 07. Entrada para a sala subterrânea onde se faz a coleta do percolado.....	74
Figura 08. Vista parcial da sala subterrânea onde se faz a coleta do percolado.....	75
Figura 09. Galões de coleta do percolado.	75
Figura 10. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro (ET_{oLis} , mm) e a soma entre a Precipitação e a Irrigação ($P+I$, °C), em período quinzenal.	104
Figura 11. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro (ET_{oLis} , mm) e a soma entre a Precipitação e a Irrigação ($P+I$, °C), em período mensal.	105
Figura 12. Comparação da evapotranspiração de referência medida no lisímetro (ET_{oLis} , mm) e a soma da precipitação e irrigação ($P+I$, mm), em período quinzenal.	106
Figura 13. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro (ET_{oLis} , mm) e a Temperatura média do ar (T_{med} , °C), em período quinzenal.	107
Figura 14. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro (ET_{oLis} , mm) e a Temperatura média do ar (T_{med} , °C), em período mensal.	107
Figura 15. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro (ET_{oLis} , mm) e a radiação solar global (R_s , $MJ.m^{-2}.d^{-1}$), em período quinzenal.	108
Figura 16. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro (ET_{oLis} , mm) e a radiação solar global (R_s , $MJ.m^{-2}.d^{-1}$), em período mensal.	108
Figura 17. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da ET_{oPMRss} e a medida da ET_{oLis} , em período quinzenal.	109

Figura 18. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToPMR_{ss}</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	110
Figura 19. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToPMR_{so}</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período quinzenal.	110
Figura 20. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToPMR_{so}</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	111
Figura 21. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToTho</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	111
Figura 22. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToCam</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período quinzenal.	112
Figura 23. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToCam</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	112
Figura 24. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToMak</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período quinzenal.	113
Figura 25. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToMak</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	113
Figura 26. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToRad</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período quinzenal.	114
Figura 27. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToRad</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	114
Figura 28. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToJH</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período quinzenal.	115
Figura 29. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToJH</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	115
Figura 30. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToLin</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período quinzenal.	116
Figura 31. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToLin</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	116
Figura 32. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToBC</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período quinzenal.	117
Figura 33. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToBC</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	118
Figura 34. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToBal</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período quinzenal.	119

Figura 35. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToBal</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	119
Figura 36. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToTrc</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período quinzenal.	120
Figura 37. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToTrc</i> e a medida da <i>EToLis</i> , em período mensal.	120
Figura 38. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToPMRss_U10</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.....	126
Figura 39. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToPMRss_U10</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.....	126
Figura 40. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToPMRso</i> e a medida da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.	127
Figura 41. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToPMRso</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.....	128
Figura 42. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToPMRso_U10</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.....	128
Figura 43. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToPMRso_U10</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.....	129
Figura 44. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToTho</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.....	129
Figura 45. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToCam</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.	130
Figura 46. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToCam</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.....	130
Figura 47. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToMak</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.	131
Figura 48. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToMak</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.....	131
Figura 49. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToRad</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.	132
Figura 50. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToRad</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.....	132
Figura 51. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToJH</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.	133

Figura 52. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToJH</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.	133
Figura 53. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToLin</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.	134
Figura 54. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToLin</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.	134
Figura 55. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToBC</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.	135
Figura 56. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToBC</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.	135
Figura 57. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToBal</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.	136
Figura 58. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToBal</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.	136
Figura 59. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToTrc</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período quinzenal.	137
Figura 60. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da <i>EToTrc</i> e a estimativa da <i>EToPMRss</i> , em período mensal.	137
Figura 61. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a <i>EToTho</i> e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.	141
Figura 62. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a <i>EToCam</i> e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.	141
Figura 63. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a <i>EToCam</i> e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.	142
Figura 64. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a <i>EToMak</i> e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.	142
Figura 65. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a <i>EToMak</i> e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.	143
Figura 66. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a <i>EToRad</i> e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.	143
Figura 67. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a <i>EToRad</i> e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.	144

Figura 68. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToJH$ e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.	144
Figura 69. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToJH$ e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.....	145
Figura 70. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToLin$ e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.....	145
Figura 71. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToLin$ e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.....	146
Figura 72. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToBC$ e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.....	146
Figura 73. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToBC$ e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.	146
Figura 74. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToBal$ e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.	147
Figura 75. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToBal$ e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.....	147
Figura 76. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToTrc$ e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.	147
Figura 77. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToTrc$ e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.....	148
Figura 78. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToTho_{ar}$, da $EToTho_{rg}$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.....	152
Figura 79. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToCam_{ar}$, da $EToCam_{rg}$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.	153
Figura 80. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToCam_{ar}$, da $EToCam_{rg}$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.	153
Figura 81. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToMak_{ar}$, da $EToMak_{rg}$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.....	154
Figura 82. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToMak_{ar}$, da $EToMak_{rg}$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.....	154
Figura 83. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToRad_{ar}$, da $EToRad_{rg}$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.	155

Figura 84. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToRad_{ar}$, da $EToRad_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	155
Figura 85. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToJH_{ar}$, da $EToJH_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.	156
Figura 86. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToJH_{ar}$, da $EToJH_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	156
Figura 87. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToLin_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	157
Figura 88. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToLin_{ar}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	157
Figura 89. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToBC_{ar}$, da $EToBC_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.	158
Figura 90. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToBC_{ar}$, da $EToBC_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	158
Figura 91. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToBal_{ar}$, da $EToBal_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	159
Figura 92. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToBal_{ar}$, da $EToBal_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	160
Figura 93. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToTrc_{ar}$, da $EToTrc_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.	161
Figura 94. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToTrc_{ar}$, da $EToTrc_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	161
Figura 95. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToTho_{ar}$, da $EToTho_{rg}$, da $EToTho$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	165
Figura 96. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToCam_{ar}$, da $EToCam_{rg}$, da $EToCam$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.	165
Figura 97. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToCam_{ar}$, da $EToCam_{rg}$, da $EToCam$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	165
Figura 98. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToMak_{ar}$, da $EToMak_{rg}$, da $EToMak$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.	166
Figura 99. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToMak_{ar}$, da $EToMak_{rg}$, da $EToMak$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.	166
Figura 100. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToRad_{ar}$, da $EToRad_{rg}$, da $EToRad$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.	167

Figura 101. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToRad_{ar}$, da $EToRad_{rg}$, da $EToRad$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.	167
Figura 102. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToJH_{ar}$, da $EToJH_{rg}$, da $EToJH$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.	168
Figura 103. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToJH_{ar}$, da $EToJH_{rg}$, da $EToJH$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.....	168
Figura 104. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToLin$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.	169
Figura 105. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToLin$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.	169
Figura 106. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToBal_{ar}$, da $EToBal_{rg}$, da $EToBC$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.	170
Figura 107. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToBal_{ar}$, da $EToBal_{rg}$, da $EToBal$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.....	170
Figura 108. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToTrc_{ar}$, da $EToTrc$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.	171
Figura 109. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToTrc_{ar}$, da $EToTrc$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.....	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Valor de K em relação à temperatura média anual (Ta , °C).....	92
Tabela 02. Fator p de Blaney-Criddle, em função da latitude e época do ano, para as latitudes 20° e 25° sul e interpolado para a latitude do local deste estudo.....	94
Tabela 03. Critérios de interpretação do coeficiente c de Camargo.	97
Tabela 04. Média das estimativas da $EToPMR_{ss}$ ($\overline{EToPMR_{ss}}$), para os períodos quinzenais e mensais, de janeiro de 2002 a dezembro de 2006.....	100
Tabela 05. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToLis$ e as demais estimativas por equações em período quinzenal, de 2002 a 2006.....	122
Tabela 06. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToLis$ e as demais estimativas por equações em período mensal, de 2002 a 2006.	122
Tabela 07. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToLis$ e demais estimativas da ETo em período quinzenal, sem os períodos em que houve falha nos dados de $EToLis$, de 2002 a 2006.....	124

Tabela 08. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToLis$ e demais estimativas da ETo em período mensal, sem os períodos em que houve falha nos dados de $EToLis$, de 2002 a 2006.	124
Tabela 09. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMRss$ e demais estimativas da ETo em período quinzenal, de 2002 a 2006.	138
Tabela 10. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMRss$ e demais estimativas da ETo em período mensal, de 2002 a 2006..	139
Tabela 11. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMRss$ e demais estimativas da ETo ajustadas localmente em período quinzenal, de 2002 a 2007.	162
Tabela 12. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMRss$ e demais estimativas da ETo ajustadas localmente em período mensal, de 2002 a 2007.	163
Tabela 13. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMRss$ e demais estimativas da ETo ajustadas localmente em período quinzenal, para o ano de 2001.	172

Tabela 14. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMR_{ss}$ e demais estimativas da ETo ajustadas localmente em período mensal, para o ano de 2001..... 173

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α - gradiente adiabático do ar saturado, $K.m^{-1}$

β - razão de Bowen

γ - constante psicrométrica, $kPa.C^{-1}$

γ^* - coeficiente psicrométrico modificado, $kPa.^{\circ}C^{-1}$

δ - declinação solar, rad

Δ - declividade da curva de pressão de vapor versus temperatura, $kPa.^{\circ}C^{-1}$

ΔS - variação do armazenamento de água no solo, mm

ε_t - ruído totalmente aleatório

ε - relação entre o peso molecular do vapor da água e do ar seco

λ - calor latente de evaporação, $MJ.mm^{-1}$

λE - fluxo de calor latente de evaporação, $MJ.m^{-2}.d^{-1}$

ρ_a - densidade absoluta do ar, $kg.m^{-3}$

ρ_j - função de auto-correlação

σ - constante de Stefan-Boltzmann, $MJ.K^{-4}.m^{-2}.d^{-1}$

σ^2 - variância

φ - latitude local, rad

ϕ_t - coeficiente de correlação que modifica Z_{t-1}

Φ - a pressão atmosférica, kPa

ω_s - ângulo horário do pôr do sol, rad

a - coeficiente para a equação de Thornthwaite

a_t - coeficiente com base na umidade relativa do ar para a equação de Turc

AR – modelo auto-regressivo

c - igual a um coeficiente “ $a + b$ ” que é função da umidade relativa mínima mensal, da razão de insolação média mensal e da velocidade média do vento a 2 m de altura para a equação de Blaney-Criddle, $mm.d^{-1}$

cl - coeficiente da equação da Radiação FAO-24, $mm.d^{-1}$

co = coeficiente da equação da Radiação FAO-24, $mm.d^{-1}$

Cov – covariância

C_p - calor específico do ar a pressão constante, $MJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

c_t - constante que permite ao modelo AR a série possua média diferente de zero

d - altura média da vegetação de referência em relação ao solo, m

D – drenagem, mm

d_r - distância relativa do sol a Terra, rad

$e^{\circ}(Tmax)$ - pressão de saturação de vapor à temperatura máxima, kPa

$e^{\circ}(Tmin)$ - pressão de saturação de vapor à temperatura mínima, kPa

e_a - pressão parcial de vapor, kPa

e_s - pressão de saturação de vapor, kPa

ET - evapotranspiração, mm

ETc - evapotranspiração da cultura, $mm.d^{-1}$

ETo - evapotranspiração de referência, $mm.d^{-1}$

ETo_{ar} - ETo ajustada localmente por AR do ruído entre modelo empírico e a média da ETo tomada como referência para estimativas mensais e quinzenais, $mm.d^{-1}$

ETo_{rg} - ETo ajustada localmente por regressão linear entre modelo empírico e a ETo tomada como referência para estimativas mensais e quinzenais, $mm.d^{-1}$

$EToBal$ - evapotranspiração de referência do Balanço de Energia, $mm.d^{-1}$

$EToBal_{ar}$ - evapotranspiração de referência do Balanço de Energia ajustada localmente pelo método AR do ruído, $mm.d^{-1}$

$EToBal_{rg}$ - evapotranspiração de referência do Balanço de Energia ajustada localmente pelo método da regressão linear, $mm.d^{-1}$

$EToBC$ - evapotranspiração de referência de Blaney-Criddle, $mm.d^{-1}$

$EToBC_{ar}$ - evapotranspiração de referência de Blaney-Criddle ajustada localmente pelo método AR do ruído, $mm.d^{-1}$

$EToBC_{rg}$ - evapotranspiração de referência de Blaney-Criddle ajustada localmente pelo método da regressão linear, $mm.d^{-1}$

$EToCam$ - evapotranspiração de referência de Camargo, $mm.d^{-1}$

$EToCam_{ar}$ - evapotranspiração de referência de Camargo ajustada localmente pelo método AR do ruído, $mm.d^{-1}$

$EToCam_{rg}$ - evapotranspiração de referência de Camargo ajustada localmente pelo método da regressão linear, $mm.d^{-1}$

ETo_{eq} - evapotranspiração estimada pelas equações a serem ajustadas, $mm.d^{-1}$

EToJH - evapotranspiração de referência de Jensen-Haise, $mm.d^{-1}$

EToJH_{ar} - evapotranspiração de referência de Jensen-Haise ajustada localmente pelo método AR do ruído, $mm.d^{-1}$

EToJH_{rg} - evapotranspiração de referência de Jensen-Haise ajustada localmente pelo método da regressão linear, $mm.d^{-1}$

EToLin - evapotranspiração de referência de Linacre, $mm.d^{-1}$

EToLin_{ar} - evapotranspiração de referência de Linacre ajustada localmente pelo método AR do ruído, $mm.d^{-1}$

EToLin_{rg} - evapotranspiração de referência de Linacre ajustada localmente pelo método da regressão linear, $mm.d^{-1}$

EToLis - evapotranspiração de referência medida em Lisímetro, $mm.d^{-1}$

$\overline{EToLis}$ - média da *EToLis* para estimativas mensais e quinzenais, $mm.d^{-1}$

EToMak - evapotranspiração de referência de Makkink, $mm.d^{-1}$

EToMak_{ar} - evapotranspiração de referência de Makkink ajustada localmente pelo método AR do ruído, $mm.d^{-1}$

EToMak_{rg} - evapotranspiração de referência de Makkink ajustada localmente pelo da regressão linear, $mm.d^{-1}$

EToPMR_{so} - evapotranspiração de referência de Penman-Monteith sendo a radiação solar global medida em estação e a velocidade média do vento medida a 2 m de altura, $mm.d^{-1}$

EToPMR_{so}_U₁₀ - evapotranspiração de referência de Penman-Monteith sendo a radiação solar global medida em estação e a velocidade média do vento medida a 10 m de altura e transportada através de equação para a altura de 2 m, $mm.d^{-1}$

EToPMR_{ss} - evapotranspiração de referência de Penman-Monteith sendo a radiação solar global estimada por equação e a velocidade do vento medida a 2 m de altura, $mm.d^{-1}$

$\overline{EToPMR_{ss}}$ - média da *EToPMR_{ss}* para estimativas mensais e quinzenais, $mm.d^{-1}$

EToPMR_{ss}_U₁₀ - evapotranspiração de referência de Penman-Monteith sendo a radiação solar global estimada por equação e a velocidade do vento medida a 10 m de altura e transportada através de equação para a altura de 2 m, $mm.d^{-1}$

EToRad - evapotranspiração de referência da Radiação FAO-24, $mm.d^{-1}$

EToRad_{ar} - evapotranspiração de referência da Radiação FAO-24 ajustada localmente pelo método AR do ruído, $mm.d^{-1}$

EToRad_{rg} - evapotranspiração de referência da Radiação FAO-24 ajustada localmente pelo método da regressão linear, $mm.d^{-1}$

$EToTho$ - evapotranspiração de referência de Thornthwaite, $mm.d^{-1}$

$EToTho_{ar}$ - evapotranspiração de referência de Thornthwaite ajustada localmente pelo método AR do ruído, $mm.d^{-1}$

$EToTho_{rg}$ - evapotranspiração de referência de Thornthwaite ajustada localmente pelo método da regressão linear, $mm.d^{-1}$

$EToTrc$ - evapotranspiração de referência de Turc, $mm.d^{-1}$

$EToTrc_{ar}$ - evapotranspiração de referência de Turc ajustada localmente pelo método AR do ruído, $mm.d^{-1}$

$EToTrc_{rg}$ - evapotranspiração de referência de Turc ajustada localmente pelo método da regressão linear, $mm.d^{-1}$

ETP - evapotranspiração potencial, $mm.d^{-1}$

$ETPp$ - evapotranspiração para uma condição padrão de 12 h de brilho solar e mês com 30 dias, $mm.d^{-1}$

ETR - evapotranspiração real, $mm.d^{-1}$

FAC - função de auto-correlação

Ft - porção do saldo de radiação utilizado para a realização da fotossíntese

g - aceleração da gravidade terrestre, $m.s^{-1}$

G - densidade do fluxo de calor no solo, $MJ.m^{-2}.d^{-1}$

G_{sc} - constante solar, $MJ.m^{-2}.d^{-1}$

H - fluxo de calor sensível do ar, $MJ.m^{-2}.d^{-1}$

i - índice de calor

I - índice de eficiência de temperatura anual

Ir - irrigação, mm

J - ordem dos dias no ano

k - constante de von Karman

K - fator de ajuste que varia com a temperatura média anual para a equação de Camargo

Kc - coeficiente de cultura

n - insolação diária, h

N - fotoperíodo ou horas de brilho solar, h

ND - número de dias

p - porcentagem diária média de luz em função da latitude e época do ano, %

P - precipitação, mm

Pl - porção do saldo de radiação utilizado para no aquecimento vegetal

Qe - fluxo de água de entrada do sistema, mm

Q_s - fluxo de água de saída do sistema, mm
 r - albedo ou coeficiente de reflexão
 R - constante para ar seco, $J.Kg^{-1}.K^{-1}$
 r_a - resistência aerodinâmica, $s.m^{-1}$
 R_a - radiação solar no topo da atmosfera, $MJ.m^{-2}.d^{-1}$
 R_n - saldo de radiação líquida total, $MJ.m^{-2}.d^{-1}$
 R_{nl} - o saldo de radiação de ondas longas, $MJ.m^{-2}.d^{-1}$
 R_{ns} - saldo de radiação de ondas curtas, $MJ.m^{-2}.d^{-1}$
 r_s - resistência da superfície, $s.m^{-1}$
 R_s - radiação solar global, $MJ.m^{-2}.d^{-1}$
 t - identifica a ordem da memória de um evento passado
 T_9 - temperatura medida às 9 horas da manhã, $^{\circ}C$
 T_{21} - temperatura medida às 21 horas, $^{\circ}C$
 T_a - temperatura média anual, $^{\circ}C$
 T_o - temperatura absoluta média do ar, K
 T_{omax} - temperatura absoluta máxima, K
 T_{omin} - temperatura absoluta mínima, K
 $T_{máx}$ - a temperatura máxima do dia $^{\circ}C$
 T_{med} - temperatura média mensal, $^{\circ}C$
 T_{min} - a temperatura mínima do dia, $^{\circ}C$
 T_{po} - temperatura média no ponto de orvalho, $^{\circ}C$
 T_u - temperatura do bulbo úmido, $^{\circ}C$
 U_2 - velocidade média do vento medida a 2 m de altura do solo, $m.s^{-1}$
 U_{10} - velocidade média do vento medida a 10 m de altura do solo, $m.s^{-1}$
 UR - umidade relativa média do ar (%)
 UR_{min} - umidade relativa mínima do ar, %
 W - fator que representa a fração de R_s que é utilizada na ET_o
 Z - altitude local
 Z_o - comprimento de rugosidade equivalente, m
 z_{om} - altura da rugosidade da vegetação, m
 z_{ov} - altura para transferência de vapor, m
 z_p - altura de medição de temperatura e umidade, m
 Z_t - série temporal
 z_w - altura de medição da velocidade do vento, m

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	33
2. REVISÃO DE LITERATURA	37
2.1. DEFINIÇÕES E CONCEITOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	38
2.2. PROCESSO FÍSICO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	41
2.2.1. Fatores que afetam o fenômeno	42
2.3. SISTEMA SOLO, PLANTA, ATMOSFERA	44
2.4. ZONAS DE UMIDADE DO SOLO	45
2.5 FORMAS DE ESTIMATIVAS DA ET	46
2.5.1. Modelos empíricos	46
2.5.2. Modelos de correlação dos turbilhões	46
2.5.3. Modelos aerodinâmicos	47
2.5.4. Modelos de balanço de energia	48
2.5.5. Métodos combinados	49
2.5.6. Método do balanço hídrico de campo	50
2.6. MÉTODOS DIRETOS	51
2.6.1. Lisimetria	51
2.7. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA ET_o	54
2.8. REGRESSÃO LINEAR	65
2.8..1 Regressão linear simples	65
2.9. SÉRIES TEMPORAIS	66
2.9.1. Modelo Auto-Regressivo (AR)	67
3. MATERIAL E MÉTODOS	71
3.1. LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA	71
3.2. CARACTERIZAÇÃO LOCAL	72
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS LISÍMETROS	72
3.4. DADOS METEOROLÓGICOS E TRATAMENTO	75
3.4.1. Método de Thornthwaite (1948)	78
3.4.2. Método de Penman-Monteith FAO-56 (1998)	80
3.4.3. Método do Balanço de Energia	87
3.4.4. Método de Makkink (1957)	89
3.4.5. Método de Turc (1961)	90
3.4.6. Método de Jensen-Haise (1963)	91
3.4.7. Método de Camargo (1971)	91
3.4.8. Método da Radiação Solar (1975)	92
3.4.9. Método de Blaney-Criddle (1975)	93
3.4.10. Método de Linacre (1977)	95
3.5. ÍNDICES ESTATÍSTICOS DE COMPARAÇÃO	96

3.6. AJUSTE LOCAL DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA ET_0	98
3.6.1. Ajuste local das equações empíricas por AR dos ruídos	99
3.6.2. Ajuste local das equações empíricas por regressão linear	100
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
4.1. DADOS OBSERVADOS NO LISÍMETRO	103
4.2. ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS	106
4.3. ESTIMATIVAS DE ET_0 COMPARADAS ÀS MEDIÇÕES LISIMÉTRICAS	108
4.4. ESTIMATIVAS DA ET_0 COMPARADAS À ET_0PMR_{ss}	125
4.5. ANÁLISE DE AUTO-CORRELAÇÃO DO RUÍDO ENTRE A ET_0PMR_{ss} E DEMAIS ESTIMATIVAS DA ET_0	139
4.6. ANÁLISE DE AUTO-REGRESSÃO E AJUSTE LOCAL DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVAS DA ET_0	148
4.7. ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E AJUSTE LOCAL DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVAS DA ET_0	150
4.8. ESTIMATIVAS DA ET_0 AJUSTADAS LOCALMENTE COMPARADAS À ET_0PMR_{ss}	151
4.9. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PARA O ANO DE 2001	164
5. CONCLUSÕES	175
5.1. OBSERVAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	176
6. APÊNDICES	179
7. REFERÊNCIAS	233

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são bens de relevante valor para a promoção do bem-estar de uma sociedade. A água é bem de consumo final ou intermediário na quase totalidade das atividades humanas. Com o aumento da intensidade e variedade desses usos ocorrem conflitos entre usuários. Uma forma eficiente de evitar e administrar os conflitos com os usuários é a gestão integrada do uso, controle e conservação dos recursos hídricos (TUCCI, 2001).

A água é o recurso ambiental mais importante disponível na Terra, impulsionando, participando e dinamizando todos os ciclos ecológicos. É o solvente universal, o componente fundamental da dinâmica da natureza dando sustentação à vida. Sem água, a vida na Terra não seria possível. Os sistemas aquáticos têm uma grande diversidade de espécies úteis ao homem e são também partes ativas dos ciclos biogeoquímicos e da diversidade biológica do planeta Terra (TUNDISI, 2003).

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre (continente e oceano) e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (TUCCI, 2001). É extremamente dinâmico, dependente da quantidade de energia emitida sobre a Terra, do comportamento térmico dos continentes em relação aos oceanos, do dióxido de carbono e ozônio presentes na atmosfera, das características dos solos e suas ocupações, e da circulação atmosférica devido à influência da rotação e inclinação do eixo terrestre.

A transferência de água entre a superfície terrestre e a atmosfera ocorre em dois sentidos: a atmosfera-superfície, em que a água pode estar em qualquer estado físico, na

forma de precipitação de chuva, granizo e neve, e no sentido superfície-atmosfera em que transferência de água ocorre na forma de vapor, devido à evaporação e transpiração, sendo última de origem biológica (TUCCI, 2001). A planta também perde água pelo processo de gutação, em que as folhas eliminam água através dos hidatódios, ocorre quando a transpiração é muito lenta ou ausente, especialmente quando a temperatura está baixa e a umidade relativa do ar elevada. A junção do fenômeno de evaporação e transpiração é comumente chamada de evapotranspiração (*ET*).

A obtenção de uma estimativa adequada de evapotranspiração tem fundamental importância para a Agricultura, pois consiste em parâmetro indispensável ao dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, já que contabiliza a quantidade de água utilizada pelas plantas que retorna à atmosfera através da transpiração. Sendo o fenômeno de evapotranspiração parte do ciclo hidrológico, sua estimativa também é de fundamental importância para o cálculo do balanço hídrico e, assim, na estimativa da recarga hídrica de aquíferos. As estimativas de evaporação são críticas em projetos de reservatórios na área de Engenharia Civil. Há vários métodos desenvolvidos em todo o mundo para estimativa da evapotranspiração, entretanto poucos possuem aplicação prática a uma grande diversidade de condições climáticas.

Este trabalho propõe estabelecer uma análise da estimativa da evapotranspiração de referência (*ET_o*), com base em dados de lisímetro de drenagem e climatológicos fornecidos pela Estação Agroclimatológica da UNESP – Jaboticabal, com intuito de estudar o comportamento do fenômeno na região.

Pretende-se também estabelecer um comparativo estatístico entre a evapotranspiração de referência medida em lisímetro e alguns modelos conhecidos de estimativa da *ET_o*, e também entre a estimativa do método de Penman-Monteith e os demais modelos.

Através de análises de auto-correlação e modelos auto-regressivos (*AR*) do erro entre as principais metodologias de estimativa da *ET_o* e os modelos tomados como referência (medidas de *ET_o* através de lisímetro de drenagem e a estimativa de *ET_o* pela metodologia de Penman-Monteith), pretende-se ajustar localmente as equações. Bem como ajustar as mesmas equações através de regressão linear simples tomando a evapotranspiração de referência medida em lisímetro e estimativa da *ET_o* pela equação de Penman-Monteith como padrões. Também posterior análise estatística comparativa entre os ajustes e a metodologia tomada como referência.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Foi na década de 40 que houve um salto nos estudos da evapotranspiração, com a publicação de dois pesquisadores que deram importantíssima contribuição não só à Agricultura como também à Climatologia e Hidrologia. O termo “evapotranspiração” apareceu pela primeira vez no artigo denominado "An Approach Towards a Rational Classification of Climate" de Warren Thornthwaite em 1948. Até hoje, o termo, é reconhecido como a combinação da evaporação direta de uma superfície úmida com a transpiração de um vegetal. No mesmo ano, outro artigo com a mesma importância histórica e científica foi publicado por Howard Penman, "Natural Evaporation from Open Water, Bare Soils and Grass" (SEDIYAMA, 1996). Estes dois trabalhos trouxeram equações até hoje utilizadas para estimativa da evapotranspiração.

Camargo e Camargo (2000) classificam da seguinte forma o trabalho destes dois pesquisadores, o trabalho de Thornthwaite foi uma pesquisa analítica, empírica, fundamentada na análise dos fatos. Penman fez uma abordagem sintética, científica, firmada no conhecimento físico que rege o fenômeno.

De acordo com Sedyama (1996), Thornthwaite tinha a preocupação de explicar as variações sazonais do balanço de água no solo e tentar definir as diferenças regionais do clima. Por esta razão, sua equação é apenas uma função da temperatura média do ar, a partir de um índice térmico anual e do comprimento do dia para um determinado mês em questão. Penman preocupou-se com os processos físicos envolvidos na evaporação e com o desenvolvimento de uma equação, que a partir de elementos climáticos relevantes (energia

radiante, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento) expressasse a estimativa da taxa de evaporação da água livre, da umidade da superfície do solo ou da vegetação.

Na opinião de Camargo e Camargo (2000), a maior revolução na área da evapotranspiração foi a consideração de Thornthwaite sobre o conceito de evapotranspiração potencial, que colocou a *ET_o* como um elemento meteorológico padrão, fundamental, representando a precipitação necessária para atender às carências de água da vegetação. Essa, medida em unidade de medida única, milímetros, que permitiu, através de um balanço hidrológico, quantificar a água disponível no solo.

Muitas outras equações foram desenvolvidas utilizando estas equações como base, fazendo apenas modificações e adaptações dos modelos às condições climatológicas distintas das condições originais, para as quais foram desenvolvidas. Na década de 1960, com o desenvolvimento de instrumentação eletrônica moderna, tecnologias computacionais, e grandes financiamentos à pesquisa, o estudo da evapotranspiração desenvolveu-se chegando aos dias de hoje.

2.1. DEFINIÇÕES E CONCEITOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Sediyama (1996) apresenta uma tradução da definição de Evapotranspiração Potencial de Penman, como “*a quantidade de água evapotranspirada, na unidade de tempo, por uma vegetação rasteira, de altura uniforme, em crescimento ativo, que cobre completamente a superfície e sem limitação de água no solo*”.

Righetto (1998) apresenta as definições de evapotranspiração:

- *Evapotranspiração potencial ou de referência (ETP ou ETo): correspondem à perda de água de uma superfície coberta com grama batatais (Paspalum notatum Flügge) em fase de crescimento ativo, bem suprida de umidade, no centro de uma área irrigada com dimensões que permitam desprezar o transporte horizontal de vapor d'água;*

- *Evapotranspiração real (ETR): é a evapotranspiração de uma superfície sob condições naturais de vegetação e de umidade de água no solo.*

Como alternativa aos conflitos que surgiram do uso da definição de evapotranspiração potencial, criou-se o termo evapotranspiração de referência (ETo), definido pelo Boletim 24 da FAO como “a taxa de evapotranspiração para uma extensa superfície, com cobertura de vegetação padronizada, de altura uniforme, mantida entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo, com o solo completamente sombreado e sem déficit de água” (DOORENBOS; PRUITT, 1975). Essa definição é bem próxima à proposta por Penman.

No Brasil, é comumente utilizada como cultura de referência, a gramínea conhecida como grama batatais (*Paspalum notatum Flügge*), por ter a característica de adaptar-se bem a quase todos os tipos de solo e condições climáticas. Em outros países, se aceita outros tipos de culturas utilizadas como referência, como uma grama cultivada em clima frio, com características semelhantes à Azeven (*Lolium perene L*) ou Festuca (*Festuca arundinacea Schreb. “Alta”*) (ALLEN *et al.*, 1994¹, apud MEDEIROS, 2002).

Em algumas regiões do EUA, utiliza-se a alfafa (*Medicago sativa L.*) como cultura de referência, sob a justificativa de possuir características mais semelhantes aos outros tipos de cultivos, como interação aerodinâmica (rugosidade) e absorção de energia solar (albedo). No entanto não foi adotada como padrão internacional, devido ao uso difundido da grama em experimentos de evapotranspiração, seu uso como cobertura vegetal padrão de postos meteorológicos e, também, sua alta resistência às intempéries.

¹ ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; PERRIER, A. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID BULLETIN**. v.43, n.2, p.1-34, 1994.

A água consumida pelas culturas é denominada de evapotranspiração da cultura (ET_c), que é a evaporação do solo somada à transpiração das plantas. É muito comum usar a evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente de cultura (K_c) para se estabelecer a ET_c . Considerando que a ET_o refere-se a uma cultura padronizada, mantidas sob condições ideais de crescimento, encontrar-se-ia a ET_c multiplicando a ET_o pelo coeficiente específico da cultura (K_c):

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (01)$$

Os coeficientes de cultura (K_c) são obtidos experimentalmente e resumem o comportamento dos cultivos no sistema solo, planta, atmosfera, integrando fatores tais como: características próprias das culturas, época de plantio, semeadura e período vegetativo, condições climáticas predominantes e as frequências de irrigação ou de ocorrência de chuvas (SALGADO, 2001).

Para irrigações de alta frequência em culturas que cobrem parcialmente o solo, bem como para regiões com bastante precipitação, foi estabelecida o uso da metodologia dos coeficientes duplo, permitindo mais exatidão da evapotranspiração de cultura, pois divide o coeficiente da cultura em componentes de evaporação do solo e coeficiente da cultura basal (Allen *et al.*, 2005).

No boletim da FAO-24 (DOORENBOS; PRUITT, 1975) pode-se encontrar procedimentos para determinar a ET_o , coeficientes de culturas (K_c) e fatores de ajustes para calcular a ET_c para uma ampla gama de condições.

2.2. PROCESSO FÍSICO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Não há evaporação sem ingresso de energia no sistema, que seja suficiente para vencer as forças atrativas entre as moléculas na superfície da água líquida, causando assim mudança de fase para o estado de vapor. As moléculas de água estão em contínuo movimento. O efeito do ingresso de energia incidida na superfície do líquido provoca um aumento na velocidade molecular, aumentando a energia cinética até a liberação da atração das moléculas adjacentes, convertendo-as de líquido a vapor. Este fenômeno é influenciado por algumas variáveis meteorológicas e características qualitativas do meio, tais como: temperatura do ar, vento, pressão de vapor, quantidade de radiação e a concentração de sólidos solúveis na água.

A transpiração é um processo biofísico, em que a água é absorvida pelas raízes do vegetal e transferida para a atmosfera por estômatos e cutícula, atravessando uma série de resistências desde o solo, passando pelos vasos condutores (xilema), mesófilo, estômatos e finalmente indo para a atmosfera. James (1988) ressalta que, se a água armazenada no solo não for fator limitante e se os estômatos estiverem totalmente abertos, as condições atmosféricas são os fatores que controlam a evapotranspiração. O espaço vazio entre as células-guarda, que constituem o estômato, é por onde a umidade intercelular vaporiza e escapa da folha. O número de estômatos por folha depende da espécie vegetal e das condições ambientais. A regulação da abertura e fechamento dos ostíolos é feita pelas células-guardas. Quando se enchem de água, elas empurram a parede oposta ao ostíolo para as laterais e abrem o orifício. Quando falta água, elas murcham e fecham o ostíolo. O controle estomático também se dá por reação a eventos externos e internos, tais como: luz, temperatura e teor de gás carbônico.

2.2.1. Fatores que afetam o fenômeno

Conforme citado a evapotranspiração é regida por diversos fatores atmosféricos, que combinados tornam possível o fenômeno. A influência exercida por cada um dos termos esta detalhada a seguir.

Radiação Solar - a quantidade de energia, em forma de radiação solar, que alcança a superfície terrestre é dependente da latitude do local, da topografia da região e época do ano, devido às diferentes posições do sol. Entretanto, nem toda energia disponível que chega à superfície é utilizada no processo de evapotranspiração. Grande parte é transformada em energia térmica que aquece o solo e a atmosfera. O poder refletor da superfície (coeficiente de reflexão ou albedo) controla a energia absorvida. Superfícies mais claras refletem mais, por isso, possuem menos energia disponível.

Temperatura do ar - o acréscimo da temperatura do sistema provoca o aumento da energia cinética das moléculas, provocando aumento da pressão de saturação de vapor e desprendimento das moléculas do corpo líquido. Para que ocorra um aumento da temperatura é necessário ingresso de energia ao sistema, geralmente em forma de radiação solar.

Umidade do ar - a quantidade de vapor de água comparada com a máxima quantidade que o ar pode armazenar, a uma dada temperatura, é comumente chamada de umidade relativa. Se a umidade relativa do ar está a 100%, ou seja, em saturação, a capacidade evaporativa fica reduzida, pois não há espaço para incorporar moléculas de água que escapam da superfície. Por esta razão, em climas úmidos de regiões tropicais, o poder evaporante é prejudicado pela elevada umidade relativa do ar, mesmo com a alta quantidade de energia disponível destas regiões.

Vento - o vento renova a camada de ar superior à superfície evaporativa. Regiões onde há maior movimentação das massas de ar possuem maior poder evaporativo, pois diminuem a taxa de saturação local.

Pressão atmosférica – quanto menor a pressão barométrica, maior a saída de moléculas de água da superfície evaporante. A pressão barométrica diminui conforme o aumento da altitude. Com a pressão atmosférica menor, há maior espaço entre as moléculas, assim será necessária uma quantidade maior de moléculas para atingir a condição de saturação.

Silva, Folegatti e Villa Nova (2005) destacam a influência da advecção no processo evaporativo. Segundo os autores, em regiões onde ocorrem advecções fortes, a importância relativa da radiação líquida diminui, e a transferência de calor sensível das áreas circunvizinhas pode contribuir ao processo de evapotranspiração com mais energia que aquela esperada na área considerada. Isso eleva a importância da velocidade do vento e da umidade relativa do ar no processo.

A irrigação, segundo Allen e Pruitt (1986)² citados por Medeiros (2002), pode ser um fator de interferência na evapotranspiração. A irrigação modifica as condições climáticas locais, resfria o ar, deixa-o mais úmido e reduz a turbulência das massas de ar. Os autores relatam redução de 2°C a 5°C na temperatura média do ar, influenciando assim a evapotranspiração local.

² ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 112, n. 2, p. 139-155, 1986.

2.3. SISTEMA SOLO, PLANTA, ATMOSFERA

As plantas absorvem grande quantidade de água para seu crescimento e sustentação, em quantidades muito maiores do que qualquer outra substância usada para o mesmo fim. No entanto, só uma pequena parte desta água fica retida nos tecidos da planta, sendo a maior parte lançada à atmosfera em forma de transpiração (FERREIRA; VALENZUELA, 1976).

A magnitude do potencial hídrico do solo varia significativamente de acordo com os ciclos de aporte de água, precipitações ou irrigação e o tipo de solo. O valor de potencial mátrico pode atingir de 0,01 *atm* em solos úmidos até 15,0 *atm* quando o solo alcança o ponto de murcha permanente (SALGADO, 2001).

A água é conduzida até as folhas através dos vasos xilemáticos, movendo-se entre as células em fluxo pelas paredes celulares. O potencial da água é quase o mesmo no vacúolo, citoplasma e na parede celular de uma determinada célula. Se em algum caso particular, estas igualdades não se mantêm, a água é redistribuída até as zonas com potenciais menores. Isto ocorre quando há a evaporação a partir do poro estomático (SALGADO, 2001). O mesmo autor adverte que, tanto a raiz quanto o xilema e o poro estomático oferecem resistências à passagem da água, e que a relação entre as resistências da planta e do solo ainda não é totalmente conhecida.

Com relação à atuação vegetal no processo de transpiração, Sedyama (1996) afirma que, geralmente, a parte superior do dossel da cultura possui a maior ação de transferência de calor e vapor. É a zona de maior absorção do saldo de radiação. Segundo o mesmo autor, a troca de vapor dos estômatos dentro da cobertura vegetal é governada pelas resistências, que são semelhantes para dióxido de carbono.

2.4. ZONAS DE UMIDADE DO SOLO

Para a boa compreensão dos processos da evapotranspiração, é importante conhecer alguns conceitos simples relacionados ao armazenamento de água no solo. O que se encontra acima da superfície freática denomina-se zona de aeração ou zona vadosa. A umidade nela pode distribuir-se de modo irregular, mas esquematicamente podemos distinguir em três subzonas (SÁNCHEZ, 2006):

- Subzona de evapotranspiração: é a camada logo abaixo da superfície, sendo afetada diretamente pelo fenômeno. Pode ter apenas alguns centímetros, se não há vegetação, ou até vários metros.

- Subzona capilar: sobre a superfície freática. A água sobe por capilaridade, sua espessura é muito variável e dependente da granulometria do solo.

- Subzona intermediária: encontra-se entre as descritas anteriormente. Algumas vezes são inexistentes, outras, com muitos metros de espessura.

Em toda a zona vadosa, pode haver água que infiltrou pela superfície ou conter água por capilaridade.

A taxa de movimento de água no solo, em direção as raízes, é dependente do gradiente de umidade, da condutividade do solo e da estrutura radicular. As principais propriedades do solo relacionadas ao fluxo, além do teor de água disponível às plantas, são: porosidade, textura e estrutura.

Há uma interação contínua entre a atmosfera, o solo e a planta. A absorção é função das condições hídricas do solo, dos fatores ligados ao sistema radicular (densidade e profundidade das raízes) e à parte aérea da planta, principalmente a área foliar e a própria demanda atmosférica que condiciona a transpiração.

2.5 FORMAS DE ESTIMATIVAS DA ET

2.5.1. Modelos empíricos

Os modelos empíricos utilizam certas variáveis meteorológicas básicas, que em conjunto a outras características edáficas e das comunidades vegetais, determinam o fluxo total de vapor de água no sistema solo-planta, e, portanto, são úteis para estimar a quantidade total de água perdida, ou evapotranspiração potencial. Entretanto, alerta Sedyama (1996), geralmente os métodos empíricos são aplicáveis apenas a longos períodos, e a exatidão das estimativas está limitada pela dependência de poucas variáveis. Mas pode ser uma boa alternativa, se a equação for ajustada localmente, exatamente pela necessidade de poucos parâmetros.

Métodos empíricos muito comuns são os métodos que contam com a temperatura do ar como variável principal em substituição ao balanço de energia (JACOBS, 2001). Como comentado anteriormente, existe uma relação entre os parâmetros Radiação solar e Temperatura. Um exemplo deste tipo de método é o de Thornthwaite.

2.5.2. Modelos de correlação dos turbilhões

A metodologia foi proposta por Swinbank, em 1951. O método requer alta resolução temporal (centésimos de segundos), medições verticais do vento, da temperatura e da umidade do ar. O método também exige que os instrumentos sejam de resposta rápida, e que sejam

sensíveis o suficiente para detectar variações de todas as variáveis simultaneamente, causadas pela passagem de diferentes vórtices turbulentos (BERLATO; MOLION, 1981).

É o único modelo capaz de medir diretamente os fluxos na atmosfera, enquanto os outros métodos apenas produzem estimativas a partir dos gradientes verticais das propriedades. Entretanto, o modelo requer instrumentação de difícil operacionalização, alto custo e necessidade de pessoal especializado, o que é um obstáculo à utilização do método. Por essas razões, os métodos que envolvem o balanço de energia e o método aerodinâmico são mais difundidos.

2.5.3. Modelos aerodinâmicos

Nestes modelos a evapotranspiração é estimada mediante uma equação aerodinâmica, em que a temperatura de radiação é substituída pela temperatura aerodinâmica. O fluxo de calor latente é calculado como resíduo final na equação de balanço de energia (CHOUDHURY; REGINATO; IDSO, 1986).

Este tipo de modelo busca a determinação dos fluxos a partir de medidas da velocidade horizontal do vento. Tendo-se boas medidas dos perfis de vento, de temperatura e de umidade, suas estimativas são comprovadamente boas (RIGHI, 2004). Ainda de acordo com o autor, a aplicação do método é recomendada apenas a culturas de baixa altura.

O método mostra-se sensível às diversas condições de estabilidade da massa de ar e costuma apresentar subestimativa em regiões de alta instabilidade atmosférica (SEDIYAMA, 1996).

2.5.4. Modelos de balanço de energia

A aproximação da razão de Bowen é o método mais comumente usado para a estimativa da evapotranspiração por balanço de energia. A instrumentação requerida e procedimentos técnicos envolvidos geralmente limitam o método do balanço de energia para estudos em períodos de tempo relativamente curtos. Raramente têm-se medidas contínuas durante a temporada. Os resultados podem ser muito seguros, se as medidas são precisas, porque eles são obtidos sob condições de ambiente natural (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1989).

O processo de *ET* é controlado pela energia disponível e pela capacidade evaporativa da água de ser transferida de uma superfície, de forma que utilizando a expressão do balanço de energia numa cobertura vegetal, desconsiderando-se o armazenamento de energia no solo e/ou na biomassa e a quantidade de energia utilizada na fotossíntese, a energia resultante do balanço é aproximadamente à energia necessária para ocorrer a *ET*.

Segundo Righi (2004), citando Lewis (1995)³, em 1915, Schmidt estimou pela primeira vez a evaporação usando o balanço de energia, introduzindo a relação simplificada, sendo o saldo de fluxo de calor:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (02)$$

Entretanto β é chamado Razão de Bowen, pois o cientista I. S. Bowen, em 1926, desenvolveu toda a teoria e o coeficiente ficou assim conhecido em sua homenagem. λE e H

³ LEWIS, J.M. The story behind the Bowen ratio. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 76, n. 12, p. 2433-2443, 1995.

são, respectivamente, o fluxo de calor latente de evaporação ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) e o fluxo de calor sensível do ar ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$).

Os métodos baseado nas propriedades conservativas da camada limite acima da cobertura vegetativa da planta, tal como o balanço de energia e o aerodinâmico, apresentam dificuldades, segundo Sedyama (1996), porque envolvem medições e correlações de fluxos turbulentos e componentes da razão de Bowen, em condições específicas de tal forma que os fluxos horizontais sejam insignificantes.

2.5.5. Métodos combinados

O método combinado consiste na associação dos termos diabáticos (saldo de energia na superfície) e adiabáticos (processos de transferência pelos componentes aerodinâmicos) da evaporação. Penman, na década de 40, foi o primeiro a propor um modelo com estas características, porém ainda não incluía a função de resistência da superfície para a transferência de vapor. Monteith incluiu esta função anos mais tarde, dando origem à equação reconhecida por muitos estudiosos como padrão, a equação de Penman-Monteith, equação que teve sua metodologia padronizada pelo boletim FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998). Essa equação não somente concilia os aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos, mas também inclui a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor d'água no ar, e a resistência da superfície (planta) à transferência de vapor d'água.

JACOBS (2001) afirma que as equações do tipo combinado têm os melhores resultados para uma maior variedade de superfícies vegetadas e climas, e sua aplicação é a mais recomendada, se o local possui todas as variáveis necessárias.

Os métodos combinados geralmente tendem a superestimar a evapotranspiração. Uma possível explicação é o fato de estes métodos utilizarem médias mensais de pressões de vapor, velocidade do vento, radiação e temperatura do ar em suas equações. Estes parâmetros são mais representativos se forem usados em médias diárias e até horárias (JENSEN; BUNMAN; ALLEN, 1989).

2.5.6. Método do balanço hídrico de campo

Este método é baseado no princípio da conservação de massa aplicado ao ciclo hidrológico. As variáveis envolvidas são baseadas nos fenômenos hidrológicos de maior relevância. O balanço hídrico para uma bacia pode ser descrito como:

$$ET = (P + Q_e) - (Q_s + \Delta S) \quad (03)$$

em que a ET é a evapotranspiração, Q_e e Q_s são os fluxos de água que entram e saem do sistema, respectivamente, P é a precipitação (e pode também incluir a irrigação) e ΔS é a variação do armazenamento de água no solo.

Existem diversos tipos de balanços hídricos, cada um com sua finalidade principal. Um dos mais comuns, e que também pode servir para a estimativa da ET_o , é o modelo de Thornthwaite (1948) e posteriormente modificado por Mather em 1955. Este ficou conhecido como “Balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955)⁴”, método descrito por Costa (1994).

⁴ THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The Water Balance. **Publ. in Climatology**. C.W. Thornthwaite & Associates, Centerton, New Jersey. v. 8, n. 1, 1955.

Devido aos erros nas medições das variáveis de entrada, saída e armazenamento, este método é pouco recomendado. Sua aplicação restringe-se às bacias hidrográficas e requer a montagem de diversos equipamentos (linígrafos, vertedores, pluviômetro etc.). Sua aplicação é restrita a grandes projetos (DIEZ; FERRATI, 200-).

Na Literatura, pode-se encontrar este método como uma estimativa direta, porém alguns dos parâmetros que fazem parte do balanço não possuem estimativa direta, a exemplo do cálculo do escoamento superficial que faz parte do parâmetro de fluxos de saída de água.

2.6. MÉTODOS DIRETOS

2.6.1. Lisimetria

Dentre os métodos diretos, a lisimetria é a que possui a maior aceitação no meio acadêmico, servindo de ajuste para outros métodos indiretos. Entretanto, o alto custo de implantação limita seu uso a estudos acadêmicos.

Machado (1996) afirma que o primeiro relato de utilização de lisímetro ocorreu em 1688, na França, em que de La Hire utilizou recipientes de chumbo preenchidos de solo argiloso-arenoso e observou a perda de água dos lisímetros cobertos com grama em comparação com os sem cobertura. Thornthwaite foi o primeiro a utilizar lisímetros de nível constante.

Os lisímetros inicialmente foram utilizados para estudo de percolação, e passaram a ser chamados de evapotranspirômetros quando sua função é a estimativa da evapotranspiração. A palavra lisímetro vem do grego, *lysis* significa dissolução ou movimento

e *metron* mensurar. Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982) no Boletim FAO-39 definem um lisímetro como “grandes contêineres preenchidos com solo (ou incluso um bloco de solo) localizados no campo, para representar o ambiente local, com superfície vegetada ou solo nu, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento, ou de uma cobertura de referência, ainda, da evaporação a partir de um solo não vegetado”. Tal como representado na **Figura 01**.

Figura 01. Esquematização de um lisímetro de drenagem livre.

As variáveis controladas junto ao lisímetro (precipitação, escoamento, infiltração, armazenamento e percolação) permitem estabelecer a evapotranspiração real ou potencial. Para determinação da *ETR*, mantêm-se as condições naturais de umidade do solo. Para determinar a *ETP*, promove-se a irrigação da cultura implantada no lisímetro, mantendo-se o solo em capacidade de campo (TUCCI, 2001).

Silva, Folegatti e Maggiotto (1999) classificam os tipos de lisímetro em categorias:

- Não-pesáveis, com lençol freático de nível constante;
- Não-pesáveis, com drenagem livre;
- Pesáveis, em que a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem.

Há também a classificação segundo o tipo de perfil (reconstituído ou monolítico) e o sistema de drenagem (por vácuo ou gravidade).

Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982) orientam sobre as condições de projeto de lisímetros:

- O lisímetro deve ser grande e profundo, para evitar efeito de “limite” e restrição de desenvolvimento das raízes;
- As condições físicas dentro do lisímetro devem ser comparáveis com as de fora;
- A altura da planta, a densidade e o arranjo devem ser similares, dentro e fora do lisímetro.

Para uma boa estimativa de evapotranspiração do lisímetro, devem se tomar precauções para sua operação. Sedyama (1996) relata dificuldades, como a manutenção das condições internas do lisímetro iguais ou semelhantes às condições externas evitando assim o efeito buquê. A não uniformidade da vegetação, interna e externa ao lisímetro, principalmente quando dentro do lisímetro é maior que fora, provoca uma perturbação maior no movimento horizontal do ar sobre a cultura, aumentando o grau de turbulência do calor sensível do ar, ocasionando um aumento na transpiração da vegetação.

As folhas sobrepostas na área limite utilizam a energia adicional do entorno no processo de evaporação provocando erro sistemático, causando estimativas tendenciosas (RITCHIE, 1996).

Marques (1972) acrescenta que um evapotransporímetro sofre limitações que provocam erros à medida, como efeitos térmicos, em que a transferência de calor entre o solo no interior do lisímetro e o de fora será diferente devido à condutividade térmica distinta dos meios e a perturbação causada quanto à acomodação do solo dentro do aparelho. O autor ainda chama a atenção quanto ao erro provocado pela drenagem, que terá particularidades com relação ao que ocorre naturalmente em campo, a água assumirá drenagem preferencial no

centro do lisímetro e junto às paredes, por uma não acomodação adequada do solo junto aos limites do aparelho e por uma irrigação que não seja administrada homogeneamente.

O cálculo da ET é feito através da seguinte equação de conservação de massa:

$$ET = I + P - D \pm \Delta S \quad (04)$$

em que a I é a irrigação (mm), P a precipitação (mm), D a drenagem (mm) e ΔS é a variação do armazenamento de água no solo. Uma barreira nos limites da parte superficial do lisímetro é imprescindível para evitar o escoamento superficial e garantir a infiltração de toda a água incidida sobre o aparelho. Para que o lisímetro seja operado em condição potencial, é necessário que o solo seja mantido em condições de capacidade de campo. Assim, sendo a variação do armazenamento pode ser considerada desprezível ($\Delta S \approx 0$).

Allen, Pruitt e Jensen (1991) afirmam que, quando as medidas do lisímetro diferem muito das estimativas feitas por modelos com forte base física, como o de Penman-Monteith FAO 56, é possível que o dispositivo lisimétrico não esteja representando as condições ambientais de estudo.

2.7. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA ET_o

Devido ao grande número de métodos e equações visando à estimativa da evapotranspiração, a grande variabilidade dos parâmetros que influenciam o fenômeno, e também ao fato de muito desses modelos serem empíricos, é comum que os pesquisadores lancem mão de artifícios estatísticos para comparar os métodos e, assim, avaliar aquele que tem maior aplicabilidade ao local de estudo.

López-Urrea *et al.* (2006) avaliaram sete modelos de cálculo diário de evapotranspiração em comparação a um lisímetro de pesagem, para um clima semi-árido na Província de Albacete, na Espanha. Os modelos avaliados foram: FAO-56 Penman-Monteith, Hargreaves e Samani⁵, Radiação FAO-24, Penman (II) FAO-24, Penman (I) FAO-24, Penman e Blaney-Criddle FAO-24. Para as condições de semi-aridez, os autores concluíram que o método Penman-Monteith FAO-56 foi o mais adequado para o cálculo de *ET_o*, comparado às medições do lisímetro. A equação de Hargreaves foi a segunda mais precisa, apesar da simplicidade do método, junto com o método Radiação Solar FAO-24 que superestimaram a *ET_o* em torno de 5%. O método FAO-24 Penman (I) e (II) e, especialmente, o método Blaney-Criddle FAO-24 superestimaram significativamente em relação às medições do lisímetro, 17%, 29%, 100% respectivamente. Enquanto a equação de Penman subestimou em 30% a *ET_o*.

Barreto (2006) estimou a evapotranspiração pelos métodos de Penman-Monteith FAO-56, de Thornthwaite (1948), do tanque Classe A (FAO-24), de Hargreaves e Samani (1985)⁴, de Blaney-Criddle FAO-24 e de Makkink (1957)⁶ com base em dados da estação meteorológica do CRHEA (Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo) localizada no município de Brotas. O autor encontrou grande variabilidade entre os métodos. A estimativa pelo método de Penman-Monteith FAO-56 neste estudo não diferiu muito dos valores encontrados pelo método de Thornthwaite (1948), apesar de apresentar-se com estimativa maior na maior parte do período estudado. O autor observou que o comportamento semelhante dos métodos indica que os componentes: radiação solar e temperatura são determinantes na estimativa da *ET_o* na região. O método de Hargreaves e

⁵ HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. In: Soc. Agri. Eng. Meeting Chicago, Amer.. p. 85-2517, 1985.

⁶ MAKKINK, G.F. *Testing the Penman formula by means of lysimeters.* **Journal of the Institution of Water Engineering.** v. 11, n. 3, p. 277-288, 1957.

Samani (1985)⁴ apresentou estimativas maiores que a precipitação ocorrida durante o período e concluiu que o método de Thornthwaite (1948) é o mais indicado para a região.

Valdívia (2005) realizou um trabalho de comparação de métodos de estimativa de evapotranspiração no município de Brotas, em zona de afloramento do aquífero Botucatu. Os métodos de Thornthwaite (1948), Penman-Monteith FAO-56, Blaney-Criddle FAO-24, Hargreaves e Samani (1985)⁵ e Makkink (1957)⁶ foram comparados a estimativas de um lisímetro de drenagem localizado junto à estação climatológica. Objetivou-se encontrar o método mais adequado para ser incorporado ao balanço hídrico. O autor observou que a estimativa pelo método de Penman-Monteith FAO-56, ficou comprometida, devido à ocorrência na região de uma estação seca e outra úmida, inadequada à aplicação do método. O método de Blaney-Criddle FAO-24 superestimou muito a evapotranspiração de referência. O modelo de Hargreaves e Samani (1985)⁵ superestimou muito os valores de ET_o , superando até a precipitação ocorrida no período. O tanque Classe A FAO-24 apresenta os menores valores estimados de evapotranspiração de referência. O autor concluiu que os modelos de Makkink (1957)⁶ e de Thornthwaite (1948) são os mais indicados à região, dando destaque ao modelo de Thornthwaite (1948) por apresentar os valores mais próximos ao do lisímetro de drenagem.

Xu e Chen (2005) avaliaram sete modelos de evapotranspiração e seus desempenhos no estudo de balanço hídrico em comparação as estimativas de um lisímetro e dados hidrológicos da estação meteorológica de Mönchengladbach, na Alemanha. Os autores concluíram que, para o cálculo da recarga hídrica do solo através de balanço hídrico, quatro, Granger e Gray (1989), Thornthwaite (1948), Makkink (1957)⁶ e Priestley-Taylor (1972)⁷, dos sete modelos obtiveram igualmente bons resultados com erros abaixo de 10%. Os piores

⁷ PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v.100, p.81–92, 1972.

resultados foram obtidos pelos modelos CRAE de Morton (1983), seguido dos modelos de Advection-Aridity de Brutsaert e Stricker (1979)⁸ e Hargreaves e Samani (1985)⁵.

Pereira e Pruitt (2004) compararam dados estimados de ET_o , de uma equação modificada de Thornthwaite por Camargo *et al.* (1999) e de Penman-Monteith (FAO-56) para dois ambientes distintos, para o clima seco de Davis, Califórnia-EUA, e para Piracicaba-SP, com verão úmido e inverno seco. Thornthwaite modificado resultou em estimativas tão boas quanto o método Penman-Monteith indicado pela FAO-56, entretanto com pontos mais difusos. Não houve muita diferença entre as estimativas com a temperatura efetiva diária e temperatura efetiva do fotoperíodo, que considera a temperatura somente no período de incidência solar.

Martínez-Cob e Tejero-Juste (2004) avaliaram a equação de Hargreaves e Samani (1985)⁵ em relação à equação de Penman-Monteith FAO, e dados de um lisímetro de pesagem, para estimativas mensais de ET_o , sob condições semi-áridas do médio vale do rio Ebro, no nordeste da Espanha. Os autores encontraram que a equação de Hargreaves e Samani (1985)⁵ tem boa correlação com os dados de ET_o estimada por lisímetro. No entanto, a precisão da equação pode variar com as condições climatológicas particulares locais. A comparação com a equação FAO-56 Penman-Monteith para dados mensais, indicam boa correlação entre as equações em locais com alta incidência de ventos fortes, com erros de 2 a 5%, e não muito boa em locais com baixa velocidade de vento, com erros entre 7 a 10%, no entanto locais sem ventos chegam a erros entre 14 e 20%. No geral equação de Hargreaves e Samani (1985)⁵ apresenta uma tendência de subestimar os valores de ET_o .

Cunha (2003) utilizou um lisímetro de drenagem para determinação da recarga subterrânea potencial. O lisímetro foi preenchido com solo natural da região da bacia do Ribeirão do Lobo, no município de Brotas-SP, e recoberto com pastagem. Mediu-se a

⁸ BRUTSAERT, W.; STRICKER, H. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. **Water Resources Research**, v.15, n.2, p.443–450, 1979.

evapotranspiração real na ordem de 650 *mm* anuais no lisímetro. Foi estimada, também, a evapotranspiração potencial pelos métodos de Penman-Monteith FAO e Thornthwaite (1948). O método de Penman-Monteith FAO apresentou uma evapotranspiração potencial de 1667,6 *mm* anuais, sendo 260% maior que o valor obtido no lisímetro, maior, também, que a precipitação no período, que foi de 1416 *mm*. O método de Thornthwaite (1948) apresentou uma evapotranspiração potencial de 1170 *mm* anuais, sendo 160% maior que o valor obtido no lisímetro.

Medeiros, Sentelhas e Lima (2003) apresentaram uma avaliação da determinação da evapotranspiração de referência a partir de medidas lisimétricas e de métodos de estimativa, os quais foram comparados com os valores de *ET_o* obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56. O estudo foi realizado em Paraipaba, região litorânea do Estado do Ceará. O micro-clima da região é classificado como semi-árido, com maior concentração de chuvas ocorrendo de março a maio, sendo o restante do período seco. Os autores concluíram que a diferença encontrada entre a estimativa do lisímetro e a do método de Penman-Monteith FAO-56 foi devida a erros no manejo do evapotranspirômetro. A conclusão foi reforçada pela boa correlação encontrada com os métodos calibrados localmente Priestley-Taylor (1972)⁷ (com $a = 1,19$) e Thornthwaite modificado (com $f = 0,379$) com o método de Penman-Monteith FAO-56.

Mendonça *et al.* (2003) objetivaram estabelecer coeficientes de ajuste regionais, comparando estimativas de um lisímetro de pesagem a outros oito métodos. Os dados foram obtidos na Estação Evapotranspirométrica da UENF/PESAGRO-Rio, localizada na Estação Experimental de Campos dos Goytacazes, RJ. Os autores observaram que os métodos Penman-Monteith FAO, Radiação Solar FAO-24, Linacre (1977), Jensen-Haise (1963)⁹, Hargreaves e Samani (1985)⁵ e Tanque Classe A FAO-24 apresentaram tendências de

⁹ JENSEN, M.E.; HAISE, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Jour. of the Irrig. and Drain.** Division, ASCE. v. 89, p.15-41, 1963.

superestimar a ETo, 9,7; 25,7; 15,9; 51,5; 23,5 e 30%, respectivamente. métodos de Makkink (1957)⁶ e Atmômetro subestimaram a ETo determinada no lisímetro em 4,2 e 38,3%, respectivamente. Os autores concluíram que todos os métodos avaliados atendem satisfatoriamente à estimativa da região, com exceção do Atmômetro SEEI modificado. Makkink (1957)⁶ foi o que mais se aproximou do valor medido no lisímetro, seguido pelo método de Penman-Monteith FAO.

Kashyap e Panda (2001) testaram 10 diferentes equações de estimativa da *ETo* em comparação a um lisímetro com balança, para uma fazenda experimental do Indian Institute of Technology, localizado em Kharagpur-Índia com o clima classificado como sub-úmido típico. Para as condições climáticas apresentadas os autores encontraram que as metodologias de Penman-Monteith (1965)¹⁰, Kimberly-Penman de Wright (1982)¹¹, Penman FAO-24, Turc (1961)¹², Blaney Criddle FAO-24 e Priestley-Taylor (1972)⁷, nesta ordem, foram as mais recomendadas para a estimativa da ETo na localidade. Os autores também desaconselharam o uso das metodologias Penman (1948), Hargreaves e Samani (1985)⁵, Radiação FAO-24 e Penman corrigida FAO-24.

Villaman *et al.* (2001) realizaram um estudo na região de Montecillo, México. Os autores compararam os métodos de Thornthwaite e Holzman (1942)¹³, Aerodinâmico, Balanço de energia (Razão de Bowen), Sistema de Bowen e Penman-Monteith à evapotranspiração medida em lisímetro de pesagem, tomado como referência. Dos métodos comparados, o método de Penman-Monteith, o de Balanço de energia (Razão de Bowen), assim como o Sistema de Bowen proporcionaram uma melhor predição da evapotranspiração.

¹⁰ MONTEITH, J.L. Evaporation and the environment. In: Symposium of the Society of Exploratory Biology 19, 205-234, 1965.

¹¹ WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. **J. Irrig. Drain. Eng. Div.**, v. 108, n. 1, p. 57-74, 1982.

¹² TURC, L. Estimation of irrigation water requeriments, potential evapotraspiration: a simple climatic formula envolved up to date. **Ann. Agr.**, v. 12, p. 13-49, 1961.

¹³ THORNTWHAITE, C.W.; HOLZMAN, B. Measurement of evaporation from land and water surfaces. **US Dept. Agr. Tech. Bull.** v. 817, p. 75, 1942.

Os métodos de Thornthwaite e Holzman (1942)¹³ e Aerodinâmico subestimam e superestimam, respectivamente, a evapotranspiração em maior proporção que os outros métodos estudados.

Camargo e Sentelhas (1997) compararam 21 modelos de estimativa de evapotranspiração, utilizando dados de três estações meteorológicas localizadas nas cidades de Campinas, Pindamonhangaba e Ribeirão Preto, no Estado de São Paulo. Os autores compararam, utilizando critérios de interpretação do coeficiente “c” de Camargo, proposto pelo primeiro autor em relatório para o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, as estimativas dos métodos a valores de evapotranspirômetros localizados nessas estações. Apenas os métodos de Camargo (1971)¹⁴, Thornthwaite (1948), Thornthwaite índice T de Camargo (1962) e Priestley-Taylor (1972)⁷ apresentaram desempenho considerado “Muito Bom”. Os métodos Penman-Monteith (1965)¹⁰, Penman (1948), Hargreaves modificado, Makkink (1957)⁶ e Blaney-Criddle modificado por Camargo (1962) receberam a classificação “Bom” por seu desempenho nestas localidades. Os demais métodos receberam avaliação de “Mediano” a “Péssimo”.

Com a justificativa que o modelo de Penman-Monteith é considerado um modelo padrão e que muitas estações não têm outros parâmetros disponíveis além de dados de precipitação e termometria, Conceição e Marin (2005) compararam sete métodos com base na temperatura do ar ao método de Penman-Monteith da FAO, para a região do Baixo Rio Grande, noroeste do Estado de São Paulo. Entre os métodos avaliados, os de Thornthwaite modificado por Camargo *et al.* (1999) e de Hargreaves e Samani (1985)⁵ apresentaram os melhores desempenhos para a estimativa mensal da evapotranspiração de referência.

¹⁴ CAMARGO, A.P. **Balço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971. 24p. (Boletim 116)

Fisher *et al.* (2005) estimaram a *ET_o* pelos modelos de Shuttleworth e Wallace (1985)¹⁵, Penman-Monteith (1965)¹⁰, Priestley-Taylor (1972)⁷, e McNaughton e Black (1973)¹⁶, usando como referência o método desenvolvido por Penman (1948). Os dados foram coletados durante os verões de 1997 e 1998, nas montanhas de Sierra Nevada na Estação de Pesquisa Floresta Blodgett (floresta de pesquisa da Universidade da Califórnia, Berkeley). Os autores concluíram que todos os métodos obtiveram resultados similares, embora o método de Shuttleworth e Wallace (1985)¹² tenha obtido um desempenho um pouco melhor que Penman-Monteith (1965)¹⁰ e McNaughton e Black (1973)¹³. Esta similaridade ocorreu porque estes modelos derivam do modelo de Penman. Observou-se uma sensibilidade do modelo de Penman à velocidade do vento.

Silva *et al.* (2005b) compararam o método Penman-Monteith, tomado como padrão, com os métodos de Thornthwaite (1948) e Camargo (1971)¹⁴, para a região de Piracicaba-SP. Objetivaram verificar qual a influência da utilização de cada método na estimativa da *ETP* diária sobre o dimensionamento econômico de um sistema de drenagem. As estimativas dos modelos de Thornthwaite (1948) e Camargo (1971)¹⁴ subestimaram as estimativas do modelo usado como padrão. Entretanto os autores concluíram que não há influência dos métodos selecionados no dimensionamento. Os resultados da análise foram semelhantes, demonstrando a viabilidade da aplicação de métodos menos complexos, tais como Thornthwaite (1948) e Camargo (1971)¹⁴, para a determinação dos valores diários de evapotranspiração potencial.

Vescove e Turco (2005) desenvolveram um estudo na área experimental de uma fazenda com uma cultura de citros, próxima à cidade de Araraquara-SP. Foram avaliados valores médios quinzenais da estimativa da evapotranspiração de referência, para os períodos

¹⁵ SHUTTLEWORTH, W.J.; WALLACE, J.S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.111, p. 839-855, 1985.

¹⁶ MCNAUGHTON, K.G.; BLACK, T.A. A study of evapotranspiration from a Douglas fir forest using the energy balance approach. **Water Resources Research**, v. 9, p. 1579-1590, 1973.

verão-outono e inverno-primavera, utilizando-se os seguintes métodos: Penman-Monteith (FAO-56), usado como padrão, Tanque Classe A FAO-24, Radiação Solar FAO-24 e Método de Makkink (1957)⁶. Foi observado que o método de Makkink (1957)⁶ subestimou a evapotranspiração no período inverno-primavera mais que no outro período. Com relação ao método da Radiação Solar (FAO-24), para o período verão-outono houve superestimativa pelo método, mais do que no período inverno-primavera. O método do tanque Classe A FAO-24 superestimou a evapotranspiração de referência em 26% no período verão-outono e 24% no período inverno-primavera, em relação ao método-padrão.

Fontenot (2004) comparou a estimativa da evapotranspiração de sete modelos ao método Penman-Monteith (FAO), para todo o Estado de Louisiana nos EUA. Segundo o autor, o estado tem um clima que varia de úmido na parte costeira e na porção sul do estado a relativamente seco e quente na porção nordeste do estado. Para estas condições, o autor concluiu que o modelo de Turc apresentou melhores estimativas para toda a parte costeira do estado. O método FAO-24 Blaney-Criddle FAO-24, para uso em período tempo mensal, foi considerado o melhor modelo, bem como para uso em período diário no interior do estado.

Figueiredo *et al.* (2002) realizaram comparações, no Norte de Minas, entre estimativas de evapotranspiração obtidas de um tanque Classe A FAO-24 e a equação de Penman-Monteith FAO. Os autores observaram que nos meses em que a velocidade do vento é menos intensa, o componente da radiação é mais dominante e por isso as estimativas são superestimadas pelo tanque, sendo este parâmetro o de maior influência para a disparidade das estimativas de evapotranspiração de referência.

Oliveira *et al.* (2001) desenvolveram uma análise comparativa utilizando o modelo de Penman-Monteith, usado como padrão, e os modelos de Penman FAO-24, Radiação FAO-24 e Hargreaves e Samani (1985)⁵, para dados de nove estações climatológicas localizadas no estado de Goiás e do Distrito Federal. Os autores concluíram que os modelos estudados

apresentaram aproximações satisfatórias da estimativa da evapotranspiração. A estimativa mais próxima ao modelo padrão foi o modelo Penman FAO-24, seguido pelos modelos de Hargreaves e Samani (1985)⁵ e Radiação FAO-24.

Bernal (1996) comparou dados de estimativa de *ET_o* de um Tanque Classe A FAO-24, um tanque Colorado e uma equação adaptada de Penman para as condições cubanas, e a estimativa desta equação aos valores de um lisímetro. O tanque classe A superestimou a *ET_o*, enquanto o tanque Colorado subestimou, mas foi obtida uma alta correlação e estimativas muito próximas entre a equação de Penman modificada para condições cubanas e os dados recolhidos do lisímetro.

Henggeler *et al.* (1996) compararam dados de *ET_o* de um lisímetro com estimativas de sete equações, e subseqüentemente compararam com a equação de Penman-Monteith, para dados climatológicos diários de quatro estações meteorológicas no estado do Texas-EUA. Os modelos comparados foram: Kimberly-Penman de Wright (1982)¹¹, Penman corrigida FAO-24, Penman (1963), Hargreaves e Samani (1985)⁵, Radiação FAO-24, Blaney-Criddle FAO-24 e Tanque de evaporação FAO-24. Foram encontradas boas correlações com varias das equações estudadas, em relação ao modelo de Penman-Monteith, com exceções, como a Penman FAO-24 e Radiação FAO-24 com estimativas insatisfatórias. Blaney-Criddle FAO-24 apresentaram um excelente resultado. O modelo de Hargreaves e Samani (1985)⁵ poderia ter sido mais preciso se houvesse uma calibração com relação ao parâmetro vento, entretanto, é a equação que melhor se apresenta em períodos de sete dias ou mais, especialmente em locais de não aridez.

Amatya, Skaggs e Gregory (1995) compararam cinco métodos de estimativa da *ET_o* ao método de Peman-Monteith (Padronizado por Jensen, Burman e Allen, 1989), para o leste da Carolina do Norte - EUA, em clima subtropical úmido. Os autores encontraram que a equação de Turc (1961)¹² obteve a melhor estimativa anual média, Thornthwaite (1948)

subestimou em 16% a ET_o tomada como referência enquanto Hargreaves e Samani (1985)⁵ superestimou em 15%. Os outros métodos também obtiveram bons desempenhos (Priestley-Taylor, 1972⁷; Makkink, 1957⁶) mas em média o método de Turc obteve os melhores resultados de ET_o para todas as localidades testadas.

Chiew *et al.* (1995) avaliaram o desempenho de estimativas de ET_o com dados obtidos de 16 estações espalhadas por toda Austrália. Os métodos comparados foram o de Penman-Monteith, Penman FAO-24, Radiação FAO-24, Blaney-Criddle FAO-24, tanque FAO-24. Os autores obtiveram três conclusões principais com este trabalho. O método de Penman FAO-24 obteve resultado muito diferente da estimativa da ET_o de Penman-Monteith, superestimou em torno 20-40%. O método da Radiação FAO-24, Blaney-Criddle FAO-24 e Penman-Monteith obtiveram estimativas mensais similares de ET_o . Há uma satisfatória correlação entre os dados do Tanque Classe-A e do método de Penman-Monteith para evaporação total de três dias ou mais. No entanto, o tanque só deve ser usado, se há uma precisão dos coeficientes do tanque.

Apesar da equação de Penman-Monteith ser a de maior aceitação, não há uma unanimidade quanto à metodologia mais representativa da estimativa da ET_o , mesmo porque todos os métodos possuem alguma imprecisão e pontos fracos. Fica claro que há uma grande variabilidade dos fatores de influência para determinada região, por isso tantos resultados distintos com relação à metodologia que melhor representa o fenômeno. Muitas vezes faz-se necessária uma calibração local, ou até mesmo a busca por uma nova metodologia que atenda às necessidades locais.

2.8. REGRESSÃO LINEAR

A análise de regressão linear procura estabelecer a relação entre uma variável resposta y e um conjunto de variáveis independentes, $X_1, X_2, \dots, X_k$. Em outras palavras consiste na obtenção de uma equação que tenta explicar a variação da variável dependente pela variação do(s) nível(is) da(s) variável(is) independente(s) (MORETTIN, 1987; FRANCISCO, 1993).

A variável resposta y pode apresentar comportamento de diversas formas em relação a x (linear, quadrático, cúbico, exponencial, logarítmico, etc.). Para se estabelecer o modelo para explicar o fenômeno, deve-se verificar qual tipo de curva e equação de um modelo matemático que mais se aproxime dos pontos representados em um diagrama de dispersão (x,y) (MORETTIN, 1987; FRANCISCO, 1993).

Aqui nesta revisão dar-se-á ênfase na regressão linear simples, que será utilizada no estudo.

2.8.1 Regressão linear simples

A regressão linear simples constitui uma tentativa de estabelecer uma equação matemática linear (linha reta) que descreva o relacionamento entre duas variáveis.

Esta análise pode ser utilizada para diversos objetivos, que se resumem basicamente em se estimar valores de uma variável, com base em valores conhecidos da outra; explicar valores de uma variável em termos da outra ou ainda prever valores futuros de uma variável.

O modelo estatístico para esta situação seria (DRAPER; SMITH, 1981):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i \quad (05)$$

em que, Y_i é valor observado para a variável dependente Y no i -ésimo nível da variável independente X ; β_0 é a constante de regressão e representa o intercepto da reta com o eixo dos Y ; β_1 é o coeficiente de regressão que representa a variação de Y em função da variação de uma unidade da variável X ; X i -ésimo nível da variável independente X ($i = 1, 2, \dots, n$); e_i é o erro que está associado à distância entre o valor observado Y_i e o correspondente ponto na curva, do modelo proposto, para o mesmo nível i de X , e pode ser desconsiderado para a análise.

$$\beta_1 = \frac{\sum X_i \cdot Y_i - \frac{\sum X_i \cdot \sum Y_i}{n}}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}} \quad (06)$$

e

$$\beta_0 = \bar{Y} - \beta_1 \bar{X} \quad (07)$$

em que $\bar{Y}$ e $\bar{X}$ são as médias das variáveis Y e X , respectivamente.

2.9. SÉRIES TEMPORAIS

Uma série temporal é um conjunto de dados quaisquer ocorrendo temporalmente em um período específico, que pode ser obtido por observações periódicas de um fenômeno ou por processos de contagens. (MORETTIN; TOLOI, 2006; BOX; JENKINS, 1994; NELSON, 1973).

As séries temporais possuem certos padrões que podem ser:

- Processos que permanecem constante por certo tempo, com variações de período a período devido a causas aleatórias.

- Padrões que ilustram tendências no nível dos processos, de maneira que a variação de um período a outro é atribuída a uma tendência mais uma variação aleatória.

- Processos que variam ciclicamente no tempo, como em processos sazonais.

Se denominarmos uma série temporal Z , o valor do elemento no momento t pode ser escrito como Z_t ($t = 1, 2, \dots, n$).

Na análise das séries temporais objetiva-se fazer previsões futuras destas, procurar periodicidades relevantes nos dados ou, como é o objetivo deste trabalho, descrever o comportamento (MORETTIN; TOLOI, 2006; BOX; JENKINS; REINSEL, 1994; NELSON, 1973).

2.9.1. Modelo Auto-Regressivo (AR)

Modelo auto-regressivo é uma das metodologias que se pode lançar mão tanto para predição quanto para elaboração de modelos probabilísticos. Se for razoável assumir que o valor atual do elemento de uma série depende do seu passado imediato mais um erro puramente aleatório e se esta série temporal é estacionária, estando em equilíbrio estatístico, pode-se assumir que ocorre um processo AR .

Sendo Z_t uma série temporal, esta poderá se chamar processo AR de ordem p , ou $AR(p)$, se possuir um comportamento tal como (MORETTIN; TOLOI, 2006; BOX; JENKINS, 1994; NELSON, 1973):

$$Z_t = c_t + \phi_1 Z_{t-1} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + \varepsilon_t \quad (08)$$

Para metodologia usada neste trabalho não foi necessária uma ordem superior a 1. Um processo de primeira ordem, ou $AR(1)$, assumiria:

$$Z_t = c_t + \phi_1 Z_{t-1} + \varepsilon_t \quad (09)$$

em que ϕ_1 representa o coeficiente de correlação que modifica Z_{t-1} , que é o valor imediatamente anterior ao elemento de interesse, c_t uma constante que permite que a série possua média diferente de zero, ε_t é o ruído puramente aleatório e t identifica a ordem da memória de um evento passado.

A função de auto-correlação ($FAC; \rho_j$) deste modelo, para primeira ordem, pode ser descrita como:

$$\rho_j = \phi_1 \rho_{j-1} \quad (10)$$

A correlação (ρ) é dada por

$$\rho = \frac{Cov(Y, X)}{\sqrt{\sigma^2(Y) \cdot \sigma^2(X)}} \quad (11)$$

sendo X e Y valores de uma série qualquer, $\bar{Y}$ e $\bar{X}$ a média dessas séries, a variância (σ^2) é encontrada pela equação

$$\sigma^2(Y) = \sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})^2 \quad (12)$$

e a covariância (Cov) por

$$Cov(Y, X) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y}) \cdot (X_k - \bar{X}) \quad (13)$$

para a primeira ordem $\rho = \phi_1$

Para que a série temporal se caracterize como estacionária, o “correlograma” deve decair geometricamente para zero em um amortecimento exponencial ou na forma de uma senóide amortecida, como demonstrado nas **Figuras 02 e 03**.

Figura 02. *FAC* para um processo $AR(1)$ (Amortecimento exponencial).

Figura 03. *FAC* para um processo $AR(1)$ (Senóide Amortecida).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

Os dados meteorológicos para a execução deste trabalho foram fornecidos pela Estação Agroclimatológica da área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP de Jaboticabal-SP, situada nas seguintes coordenadas geográficas: 21°14'05" de latitude Sul; 48°17'09" de longitude oeste; e a 615,01 *m* de altitude média. Vide fotos da **Figura 04**.

Figura 04. Estação Agroclimatológica da área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP de Jaboticabal-SP.

3.2. CARACTERIZAÇÃO LOCAL

O trimestre mais chuvoso da região ocorre de janeiro a março, responsável por aproximadamente 43% da precipitação anual. O trimestre mais seco é de julho a setembro, equivalente a 8% de toda a precipitação anual. A média anual de precipitação é de 1424,6 mm, a umidade relativa média anual é de 70,8% e a temperatura média anual de 22,2°C. De acordo com os registros da Estação Agroclimatológica da área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP de Jaboticabal, no período de 1971-2000, em resenha disponível no site http://www.exatas.fcav.unesp.br/estacao/est_resanha.htm (Último acesso em 06/11/2007).

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS LISÍMETROS

Para a realização do estudo proposto foram utilizados dados de 12 lisímetros coletados desde agosto do ano 2000. A bateria de 12 lisímetros é do tipo sem balança de pesagem, com drenagem livre por gravidade e encontra-se dentro dos limites da Estação Agroclimatológica. Os lisímetros são construídos de concreto armado com 1,0 m² de superfície, 1,50 m de profundidade e com paredes de espessura de 0,025 m. O sistema de drenagem é em forma de “espinha de peixe”, construído de cano plástico de alta pressão, de diâmetro de 1 1/2", sendo que em cada metro de cano foram distribuídos de 30 a 40 furos de 1/4" nas partes superiores e laterais. Esse sistema localiza-se no fundo de cada caixa, sendo ligado por um cano subterrâneo de plástico de alta pressão de 1 1/2", para a coleta da água que é drenada dos

aparelhos. Sobre o sistema de dreno de plástico foram colocadas uma camada de 0,125 m de pedra britada nº2, outra de 0,125 m de pedra britada nº1, uma manta de bidin nº30 e uma camada de 0,10 m de areia grossa, constituindo assim o sistema de drenagem, o percolato é coletado por galões de 11 L onde se faz a medição do volume drenado.

As caixas foram preenchidas com Latossolo Vermelho-Escuro, distrófico, A moderado e textura argilosa, obedecendo ao perfil de solo encontrado em campo. Foi vegetada com grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), mantida com altura de 0,08 a 0,12 m em condições semelhantes a toda estação. Irrigações freqüentes de forma manual sempre que a drenagem do lisímetro chegava a um volume crítico mínimo menor que 1000 mL. Vide fotos das **Figuras 05, 06, 07, 08 e 09**.

Figura 05. Lisímetros drenagem livre por gravidade.

Figura 06. Lisímetros com vista parcial da Estação Agroclimatológica FCAV/UNESP de Jaboticabal-SP.

Figura 07. Entrada para a sala subterrânea onde se faz a coleta do percolado.

Figura 08. Vista parcial da sala subterrânea onde se faz a coleta do percolado.

Figura 09. Galões de coleta do percolado.

3.4. DADOS METEOROLÓGICOS E TRATAMENTO

Para a estimativa da evapotranspiração de referência pelas várias equações propostas e para a análise comparativa, utilizaram-se dados Meteorológicos diários cedidos pela Estação Agroclimatológica da área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas da

FCAV/UNESP, para o período de agosto de 2000 a janeiro de 2007. Foram fornecidos dados diários de (encontra-se em apêndice em médias quinzenais e mensais): temperatura média (T_{med}) e umidade relativa média do ar (UR), radiação solar global (R_s), insolação (n), Precipitação (P), velocidade média do vento a 2 m de altura (U_2), velocidade média do vento a 10 m de altura (U_{10}), medidos pelos seguintes instrumentos:

- Temperatura do ar: Termômetro de Hg em vidro. R. Fuess;
- Umidade relativa do ar: Psicrômetro comum de termômetros de Hg em vidro. R. Fuess;
- Precipitação: Pluviômetro tipo Ville-de-Paris;
- Insolação: Esfera de cristal. Fabricante: R. Fuess. Tipo: Campbell e Stokes;
- Velocidade do vento a 10 m de altura: Anemógrafo universal. Conjunto de caneca. Fabricante: IH;
- Velocidade do vento a 2 m de altura: Conjunto de canecas. Fabricante: MET-ONE. Modelo: 014AL34
- Radiação solar global: Piranômetro LI-COR, modelo LI-200SZ.

Foram fornecidas também as leituras do percolado dos 12 lisímetros para o mesmo período dos dados climatológicos, bem como o volume irrigado no período. Antes de submeter os dados à análise, eles foram tratados objetivando-se preencher as falhas ocorridas no monitoramento, como descrito mais a frente.

Como será demonstrado na descrição do método de Penman-Monteith, há uma equação para se estimar a radiação solar global, equação (40). As falhas encontradas no parâmetro R_s medida foram preenchidas pelos valores estimados pela equação.

As falhas encontradas nos dados de velocidade média do vento a 2 m de altura foram preenchidas com o uso da equação (37), demonstrado mais a frente na descrição da equação de Penman-Monteith, que se vale da velocidade média do vento a 10 m para estimar a U_2 . Os

períodos em que há falha coincidente entre as duas séries de dados, foram preenchidos com a média aritmética entre o dia anterior e posterior à falha.

Para estimar a evapotranspiração de referência a partir da drenagem lisimétrica (*ET_{oLis}*), foi usada a equação (04), em que a precipitação e a irrigação são valores conhecidos. Na operação do sistema, a irrigação era administrada sempre que a drenagem atingisse um volume crítico mínimo, sendo monitorado diariamente, de forma que os períodos de irrigação apresentaram espaçamentos variáveis. Para a determinação da *ET_{oLis}* diária considerou-se o início de um período o dia em que houvesse uma entrada de água no lisímetro, seja por irrigação ou por precipitação. O fim do período foi definido como o dia em que a drenagem chegasse a volume crítico abaixo de 1000 mL e anterior a uma nova entrada de água no tanque que provocasse aumento na percolação nos dias posteriores (No **Apêndice A** encontra-se um extrato da planilha com o cálculo efetuado para a determinação da *ET_{oLis}*). Os períodos variaram de 5 a 52 dias, com média em torno de 22 dias. O volume total do percolado para cada período foi distribuído diariamente. A partir dos dados distribuídos a *ET_o* foi estimada em total quinzenal e também mensal. Sendo a média dos períodos em torno de 22 dias, acredita-se que a estimativa mensal seja mais consistente.

As leituras lisimétricas apresentaram grandes falhas, principalmente nos períodos de maiores precipitações, em que o volume drenado frequentemente era superior ao galão de 11L. Devido a esse problema, passou-se a ler o volume drenado várias vezes ao dia, entretanto, nem sempre se evitou o transbordamento.

Para preencher as falhas por transbordamento do galão de um dos lisímetros, considerou-se a média dos demais aparelhos sem problemas. Para corrigir a falha por transbordamento de todos os lisímetros, avaliou-se a correlação, entre a estimativa feita pela equação de Penman-Monteith e os valores de *ET_o* medidos nos lisímetros nos períodos sem falhas. Esta correlação não foi muito boa ($R^2 = 0,28$; 0,40 para período quinzenal e mensal

respectivamente). No entanto, verificou-se uma melhor correlação entre os dados de precipitação mais irrigação ($P+Ir$) e a ET_o medida em períodos sem falhas ($R^2 = 0,72$; $0,69$ para período quinzenal e mensal respectivamente). Estabeleceu-se, então, uma regressão linear entre esses parâmetros, que resultaram em

$$ET_{oLis} = 8,3962 + 0,5525 \cdot (P + I) \quad (14)$$

para preenchimento quinzenal e

$$ET_{oLis} = 33,674 + 0,455 \cdot (P + I) \quad (15)$$

para preenchimento mensal.

O preenchimento das falhas foi necessário para que se tivesse uma série ininterrupta de dados, que é essencial para a realização do ajuste das equações. Como a metodologia proposta depende da análise temporal do fenômeno, lacunas na mesma dificultariam a análise e execução da proposta.

A partir dos dados climatológicos obtidos estimou-se a evapotranspiração de referência de alguns métodos em períodos mensais e quinzenais, como descritos mais a frente.

Visto que tais métodos de estimativa de evapotranspiração seguem rotinas de cálculo definidas, optou-se pela utilização do aplicativo MS-Excel para montagem das planilhas de cálculo.

3.4.1. Método de Thornthwaite (1948)

Esta equação é um modelo empírico, que conta como variável principal a temperatura do ar. Thornthwaite apresentou sua equação pela primeira vez em 1944, envolvendo

comprimento do dia, temperatura média diária e umidade relativa do ar. Em posteriores modificações do modelo, suprimiu o parâmetro da umidade relativa do ar.

A equação foi testada por inúmeros balanços hídricos climáticos, realizados em várias partes do mundo, comparando-se os excedentes hídricos obtidos com dados de escoamento de bacias hidrológicas, testando assim sua precisão e eficácia.

O método tem por base um índice de eficiência de temperatura anual I , definido como a soma de 12 valores mensais de índice de calor i . Cada índice i é uma função da temperatura média mensal $Tmed$ ($^{\circ}C$), como segue (THORNTHWAITE, 1948):

$$i = \left(\frac{Tmed}{5} \right)^{1,514} \quad (16)$$

e

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad (17)$$

A evapotranspiração potencial, em mm , é dada por:

$$ETPp = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot Tmed}{I} \right)^a \quad (18)$$

O coeficiente a é encontrado por:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,01791 \cdot I + 0,49239 \quad (19)$$

A fórmula de Thornthwaite de $ETPp$ fornece a evapotranspiração para uma condição padrão de 12 h de fotoperíodo e mês com 30 dias, a correção para se estimar a evapotranspiração mensal se dá multiplicando fatores de correções (PEREIRA; VILLANOVA; SEDIYAMA, 1997):

$$EToTho = ETPp \frac{N}{12} \frac{ND}{30} \quad (20)$$

Em que a $EToTho$ é evapotranspiração de referência ($mm.d^{-1}$) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice), para um mês de ND dias, e fotoperíodo

do 15º dia do mês N . Aconselha-se o uso da metodologia de Thornthwaite apenas para períodos mensais, por esta razão esta estimativa apenas para este.

O método foi desenvolvido para regiões áridas e úmidas. Várias regiões brasileiras, como o noroeste paulista, apresentam um período anual de déficit hídrico acentuado seguido por outro com alta intensidade de precipitação, que se assemelham às condições de onde o método foi desenvolvido (CONCEIÇÃO; MARIN, 2005).

Camargo e Camargo (2000) ressaltam que, para condições de aridez, o método frequentemente subestima a evapotranspiração potencial, e para climas superúmidos, ao contrário, pode superestimar estes valores. No entanto, o método tem boa estimativa para clima úmido, independente da latitude e altitude, comparado ao modelo de Penman. Para corrigir a subestimativa em condições de aridez ou a superestimativa em caso de superumidade, os autores sugerem o emprego de uma temperatura média, corrigida em função da amplitude térmica diária, denominada temperatura efetiva.

3.4.2. Método de Penman-Monteith FAO-56 (1998)

Esta equação foi padronizada pelo boletim número 56 da FAO e é utilizada por muitos pesquisadores como referência em relação a outras metodologias (ALLEN *et al.*, 1998).

A equação combinada de Penman-Monteith tem a forma

$$\lambda ET = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (21)$$

em que $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referência medida (kPa), ρ_a a densidade absoluta do ar ($kg.m^{-3}$), C_p o calor específico do ar a pressão constante ($MJ.kg^{-1}.C^{-1}$), Δ a declividade da curva de pressão de vapor versus temperatura ($kPa.C^{-1}$), γ a constante psicrométrica ($kPa.C^{-1}$), r_a e r_s as resistências, respectivamente, aerodinâmica e de superfície ($s.m^{-1}$), R_n a radiação líquida ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) e G a densidade do fluxo de calor no solo ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$).

Visando descrever uma vegetação hipotética de referência, foram combinadas as equações de resistência aerodinâmica e de superfície com a equação de Penman-Monteith. Em que a cultura de referência hipotética é descrita como uma superfície gramada com altura de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência de superfície de 70 $s.m^{-1}$ definida pela FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998). Combinando expressões generalizadas de densidade do ar (ρ_a), com expressões simplificadas de r_a e r_s para grama, segundo parametrização proposta pela FAO-56, a equação reduz para (ALLEN *et al.*, 1998):

$$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \frac{900}{(T_{med} + 273)} U_2 (e_s - e_a) \quad (22)$$

sendo, R_n e G o saldo de radiação total e o fluxo de calor no solo respectivamente ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), T_{med} é a temperatura média diária ($^{\circ}C$), U_2 é a velocidade média do vento medida a 2 m de altura do solo ($m.s^{-1}$), λ o calor latente de evaporação da água ($MJ.kg^{-1}$), γ^* é o coeficiente psicrométrico modificado ($kPa.^{\circ}C^{-1}$), 900 é o valor aproximado das constantes que constam na equação ($kJ^l.kg.K.d^{-1}$).

A seqüência de cálculo do método é apresentada a seguir. A declividade da curva de pressão de vapor dado por:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (23)$$

em que T_{med} é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$), dada por:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (24)$$

No entanto foi utilizada a temperatura média compensada como descreve a equação abaixo:

$$T_{med} = \frac{T_9 + T_{máx} + T_{mín} + 2 \cdot T_{21}}{5} \quad (25)$$

sendo T_9 , a temperatura medida às 9 horas da manhã, T_{21} a temperatura medida às 21 horas, $T_{máx}$, a temperatura máxima do dia e $T_{mín}$, a temperatura mínima do dia, todos em °C. A pressão de saturação é encontrada pela equação:

$$e_s = \left[\frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} \right] \quad (26)$$

sendo $e^o(T_{\max})$ a pressão de saturação de vapor à temperatura máxima (kPa) e $e^o(T_{\min})$ a pressão de saturação de vapor à temperatura mínima (kPa), as quais são expressas por:

$$e^o(\max) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_{\max}}{T_{\max} + 237,3} \right)} \quad (27)$$

$$e^o(\min) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_{\min}}{T_{\min} + 237,3} \right)} \quad (28)$$

Entretanto e_s (kPa), nesta metodologia, foi simplificado para:

$$e_s = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right)} \quad (29)$$

Para o cálculo do déficit de pressão de vapor ($e_s - e_a$), tem-se a pressão parcial de vapor e_a pela equação:

$$e_a = \left[\frac{e^o(T_{\max}) \cdot \left(\frac{UR_{\max}}{100} \right) + e^o(T_{\min}) \cdot \left(\frac{UR_{\min}}{100} \right)}{2} \right] \quad (30)$$

em que $UR_{\max}$ e $UR_{\min}$ são as umidades relativa mínima e máxima do ar, respectivamente.

No entanto, para esta metodologia, e_a (kPa) foi simplificado para:

$$e_a = e_s \cdot \left(\frac{UR}{100} \right) \quad (31)$$

em que UR é a umidade relativa média do ar (%).

O coeficiente psicrométrico é estimado por:

$$\gamma = 10^{-3} \cdot \frac{C_p \cdot \Phi}{\varepsilon \cdot \lambda} \quad (32)$$

sendo C_p , o calor específico à pressão constante, igual a $1,013 \times 10^{-3} \text{ MJ.kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, $\varepsilon = 0,622$ é a relação entre o peso molecular do vapor da água e do ar seco. Φ é a pressão atmosférica, que pode ser medida, mas nesta metodologia foi estimada pela equação:

$$\Phi = \Phi_o \cdot \left(\frac{T_o - 0,0065 \cdot Z}{T_o} \right)^{\frac{g}{\alpha R}} \quad (33)$$

em que Z é a altitude local (m), Φ_o é a pressão atmosférica ao nível do mar (kPa), g é a aceleração da gravidade terrestre, igual a $9,8 \text{ m.s}^{-2}$, R é constante dos gases ideais para o ar seco, igual a $287 \text{ J.Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, α é o gradiente adiabático do ar saturado, igual a $0,0065 \text{ K.m}^{-1}$, T_o é a temperatura absoluta média do ar em Z (K), utilizando-se a expressão:

$$T_o = 273,16 + T_{med} \quad (34)$$

Assumindo-se que $T_{med} = 20^\circ\text{C}$, obtém-se $T_o = 293,16 \text{ K}$.

Encontra-se o calor latente de evaporação da água pela equação

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \cdot 10^{-3}) T_{med} \quad (35)$$

e a constante psicrométrica modificada, pela equação

$$\gamma^* = \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2) \quad (36)$$

É comum que as estações meteorológicas não possuam a velocidade do vento medida a 2 m de altura e sim a 10 m ; neste caso pode-se estimar a velocidade do vento a 2 m através da equação:

$$U_2 = U_{10} \left(\frac{\ln \left(\frac{Z_2 - d}{Z_o} \right)}{\ln \left(\frac{10 - d}{Z_o} \right)} \right) \quad (37)$$

sendo Z_o o comprimento de rugosidade equivalente dado por $0,01476 m$, d o deslocamento do plano zero do perfil de vento igual $0,08 m$ (dado por $1/3$ da altura da vegetação de referência), que é a altura da vegetação de referência em relação ao solo.

O saldo de radiação (R_n) pode ser medido ou estimado por

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (38)$$

sendo, R_{ns} , o saldo de radiação de ondas curtas e R_{nl} , o saldo de radiação de ondas longas, em que R_{ns} é dado por:

$$R_{ns} = (1 - r) \cdot R_s \quad (39)$$

sendo r é o albedo ou coeficiente de reflexão, cujo valor recomendado em literatura para cultura padrão é $0,23$, e R_s é a radiação solar global que pode ser medida ou estimada por (ALLEN *et al.*, 1998):

$$R_s = \left(a_s + b_s \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (40)$$

a_s e b_s são constantes de valores $0,25$ e $0,50$, respectivamente, a soma destas constantes corresponde à transmissividade atmosférica, n é a insolação diária e N são as horas de fotoperíodo calculada pela equação:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (41)$$

ω_s é o ângulo horário do pôr do sol, em radianos:

$$\omega_s = \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi) \cdot \operatorname{tg}(\delta)] \quad (42)$$

em que φ é a latitude local em radianos e δ a declinação solar em radianos, encontrado pela equação:

$$\delta = 0,4093 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (43)$$

J é a ordem dos dias no ano.

R_a é a radiação solar no topo da atmosfera ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), dada por

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} G_{sc} \cdot d_r [\omega_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_s)] \quad (44)$$

sendo G_{sc} a constante solar = $0,0820 MJ.m^{-2}.d^{-1}$. d_r é a distância relativa do sol a Terra em raios, cuja equação é

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (45)$$

O saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}) é dado por:

$$R_{nl} = -\left(0,9 \frac{n}{N} + 0,1\right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \sigma \left(\frac{To \max^4 + To \min^4}{2}\right) \quad (46)$$

em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} MJ.K^{-4}.m^{-2}.d^{-1}$), $To \max$ e $To \min$, a temperatura absoluta máxima e mínima diárias respectivamente, encontrados pela equação (K):

$$\begin{aligned} To \max &= T \max + 273,16 \\ To \min &= T \min + 273,16 \end{aligned} \quad (47)$$

Entretanto o termo que envolve a temperatura máxima e mínima foi simplificado para:

$$\left(\frac{To \max^4 + To \min^4}{2}\right) \cong To^4 \quad (48)$$

O fluxo de calor no solo (G) pode ser medido ou estimado para períodos diários por

$$G = c_s \cdot \left(\frac{T_i + T_{i-1}}{\Delta_t}\right) \cdot \Delta_z \quad (49)$$

em que T_i é a temperatura do ar no dia i ($^{\circ}C$), T_{i-1} , a temperatura no dia $i-1$, Δ_t , o intervalo de tempo (dia) e Δ_z , a profundidade efetiva do solo (m). Nesta metodologia foi utilizada a equação simplificada sugerida por Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997), para períodos diários:

$$G = 0,38 \cdot (T_i + T_{i-3}) \quad (50)$$

No entanto o boletim da FAO-56 sugere que G pode ser desprezado para períodos diários.

O termo $(1+0,34 \cdot U_2)$ na equação reduzida de Penman-Monteith envolve as resistências de superfície e aerodinâmica, sendo $r_s = 70 \text{ s.m}^{-1}$ e r_a calculada por (ALLEN *et al.*, 1998)

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_w - d}{z_{om}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z_p - d}{z_{ov}}\right)}{(k)^2 \cdot U_2} \quad (51)$$

r_a é a resistência aerodinâmica à transferência turbulenta de vapor e calor sensível a partir da superfície da planta; z_w é a altura de medição da velocidade do vento (anemômetro) (2 m); z_p é a altura de medição de temperatura e umidade (2 m); z_{om} é a altura da rugosidade da vegetação (cultura de referência, 0,01476 m); z_{ov} é a altura para transferência de vapor (0,001476 m); d é a altura da vegetação em relação ao solo (0,08 m), k a constante de von Karman (0,41) e U_2 é a velocidade do vento medida a 2 m.

Testaram-se formas diferentes de cálculo da ET_o por Penman-Monteith, variando as medições de velocidade do vento às alturas de 2 m e 10 m, bem como a radiação solar global da forma estimada por roteiros de cálculo como também medida em estação automática.

A ET_oPMR_{ss} corresponde a ET_o de Penman-Monteith sendo a radiação solar global estimada por equação (R_{ss}) e a velocidade média do vento medida a 2 m de altura (U_2) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice).

A $ET_oPMR_{ss_U_{10}}$ corresponde a ET_o de Penman-Monteith sendo a radiação solar global estimada por equação (R_{ss}) e a velocidade média do vento medida a 10 m de altura e transportada através de equação para a altura de 2 m (U_{10}) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice).

A ET_oPMR_{so} corresponde a ET_o de Penman-Monteith sendo a radiação solar global medida em estação (R_{so}) e a velocidade média do vento medida a 2 m de altura (U_2) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice).

A $ET_{oPMRso_U_{10}}$ corresponde a ET_o de Penman-Monteith sendo a radiação solar global medida em estação (R_{ss}) e a velocidade média do vento medida a 10 m de altura e transportada através de equação para a altura de 2 m (U_{10}) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice).

Lyra *et al.* (2004) avaliaram a influência de 14 métodos para a determinação da média diária do déficit de pressão de saturação do ar (e_s), na estimativa da evapotranspiração de referência através do modelo de Penman-Monteith (FAO-56), utilizando como referência as medidas lisimétricas de um gramado em Piracicaba-SP. Encontraram que os métodos selecionados afetaram de forma significativa a determinação da evapotranspiração de referência. Dos métodos sugeridos pelo boletim FAO-56, apenas o que utilizou a umidade relativa média do ar para estimar a pressão parcial de vapor apresentou-se entre os que proporcionaram bons desempenhos.

3.4.3. Método do Balanço de Energia

Esta metodologia representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia com a superfície em forma de balanço. Em condições normais, o suprimento principal de energia para a superfície é dado pela radiação solar. Basicamente é o mesmo balanço que a equação de Penman-Monteith faz em sua metodologia, a diferença é que nesta metodologia não há o termo aerodinâmico.

Devido ao comprimento de onda dos raios solares, a radiação incidente é chamada de “ondas curtas”. Parte desta radiação é refletida de volta, de acordo com o poder refletor r ,

quanto maior o poder refletor menor será o balanço de ondas curtas. Portanto o balanço de ondas curtas (R_{ns}) é dado por (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997):

$$R_{ns} = R_s \cdot (1 - r) \quad (52)$$

em que R_s é a radiação solar global ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) (eq. 40).

Outra importante fonte de energia radiante emitida sobre a superfície é a radiação emitida pela atmosfera em forma de calor. A superfície terrestre emite radiação de ondas longas em função de sua temperatura. Para se encontrar o balanço de ondas longas é possível por aproximações, em que a temperatura da superfície é aproximada pela temperatura do ar. A fórmula mais comum da estimativa do balanço de ondas longas (R_{nl}) é dado por Brunt (1952)¹⁷, citado por Pereira, Villa Nova e Sediyaama (1997):

$$R_{nl} = -\left[0,56 - 0,25 \cdot (e_a)^{0,5}\right] \cdot \sigma \cdot T_{med}^4 \cdot \left[0,1 + 0,9 \cdot \frac{n}{N}\right] \quad (53)$$

em que T_{med} , é a temperatura média do ar (K), e_a é a pressão parcial de vapor (KPa) e σ é a constante de Stefan-Boltzmann igual $20,17 \times 10^{-10}$ ($mm.K^{-4}.d^{-1}$).

O saldo total de radiação da superfície (R_n) é dado então pela fórmula:

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (54)$$

O R_n é utilizado pela superfície nos processos de evaporação (λE), no aquecimento do ar (H), do solo (G), das plantas (Pl) e na fotossíntese (Ft) todos em $MJ.m^{-2}.d^{-1}$.

$$R_n = \lambda E + H + G + Pl + Ft \quad (55)$$

Sendo a fotossíntese e o calor armazenado nas plantas desprezíveis, a equação quando medida em mm passa a ser uma boa aproximação ($R_n = EToBal$) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice).

17 BRUNT, D. (1952). *Physical and dynamical meteorology*. Cambridge, Univ. Press, 428p.

3.4.4. Método de Makkink (1957)

O modelo de Makkink foi desenvolvido na Holanda em 1957, sendo uma equação bastante popular no oeste europeu e foi baseado no modelo de Penman. O pesquisador encontrou que a evapotranspiração da cultura era função, também, da altura da cultura, e então os parâmetros Z_o e d na função vento do modelo de Penman, o que equivale a uma padronização da rugosidade. O método de Makkink é dado pela equação (MAKKINK, 1957⁶ *apud* PEREIRA; VILLA NOVA; PEREIRA, 1997):

$$EToMak = (0,61 \cdot R_s \cdot W) - 0,12 \quad (56)$$

em que $EToMak$ é a evapotranspiração de referência, em gramado ($mm.d^{-1}$) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice), R_s é a radiação solar global (mm de evaporação equivalente) (eq. 40), e

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (57)$$

W é o fator que representa a fração de R_s que é utilizada na ETo , para diferentes valores de temperatura e altitude. Δ é a inclinação da curva de pressão de saturação de vapor e temperatura e γ é a constante psicrométrica ($kPa.^{\circ}C^{-1}$).

R_s em mm pode ser calculada através da relação:

$$R_s(mm) = \frac{R_s(MJ.m^{-2}.d^{-1})}{\lambda} \quad (58)$$

em que λ é o calor latente de vaporização ($MJ.mm^{-1}$).

A equação de Makkink descreve uma relação linear do tipo $Y = a + b.X$, em que $Y = ETP$, $X = W.R_s$. Seus coeficientes foram obtidos para Wagening, na Holanda, e podem variar de região para região.

W depende da temperatura do bulbo úmido (T_u). Quando não está disponível a T_u é comumente substituída pela temperatura média (T_{med}). Considerando que a $T_{med} > T_u$, W será ligeiramente maior, o que provocará uma superestimativa da ET_o .

3.4.5. Método de Turc (1961)

Este método foi desenvolvido para o oeste europeu, onde a umidade relativa do ar é maior que 50% e tem sido muito usado no EUA. A equação para a estimativa da ET_o é descrita por (TURC, 1961¹² *apud*. KASHYAP; PANDA, 2001):

$$ET_{oTrc} = a_t \cdot 0,013 \cdot \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) \cdot \left(\frac{R_s / 0,0238846 + 50}{\lambda} \right) \quad (59)$$

ET_{oTrc} é a evapotranspiração de referência ($mm.d^{-1}$) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice), T_{med} é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$), R_s é a radiação solar global ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) (eq. 40) e λ é o calor latente de vaporização ($MJ.mm^{-1}$). O coeficiente a_t tem como base a umidade relativa do ar. Se a média diária da umidade relativa média (UR) é maior ou igual a 50%, então $a_t = 1,0$, senão pode ser calculado pela equação:

$$a_t = 1 + \frac{50 - UR}{70} \quad (60)$$

3.4.6. Método de Jensen-Haise (1963)

O método consiste em uma equação empírica para o cálculo da evapotranspiração a partir da temperatura, desenvolvida para regiões áridas e semi-áridas. A equação de Jensen-Haise para a estimativa da ET_o é dada por (JENSEN-HAISE, 1963⁹ *apud* PEREIRA; VILLANOVA; SEDIYAMA, 1997):

$$ET_{oJH} = R_s \cdot (0,025 \cdot T_{med} + 0,078) \quad (61)$$

em que ET_{oJH} é a evapotranspiração de referência ($mm.d^{-1}$) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice), T_{med} é a temperatura média diária ($^{\circ}C$) e R_s é a radiação solar global convertida em unidades de água evaporada ($mm.d^{-1}$, eq. 58). Nesta metodologia foi utilizada a R_s estimada pela equação (40) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice).

3.4.7. Método de Camargo (1971)

Baseado nos resultados da equação de Thornthwaite, Camargo propôs uma nova fórmula, mais simples, porém com eficiência semelhante (CAMARGO; CAMARGO, 1971¹⁴ *apud* CAMARGO; CAMARGO, 2000). Esta metodologia é bem recomendada, pois é de cálculo fácil, necessitando apenas de dados de temperatura média (T_{med}) e radiação solar extraterrestre (R_a), sendo este último parâmetro calculado por equação e requer apenas a latitude do local.

O método estima a ET_o pela equação:

$$EToCam = K \cdot R_a \cdot Tmed \cdot ND \quad (62)$$

em que $EToCam$ é a evapotranspiração de referência ($mm.d^{-1}$) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice), R_a é a radiação solar extraterrestre, também chamada de radiação solar no topo da atmosfera ($mm.d^{-1}$, eq. 58), que foi estimada pela equação (44), $Tmed$ é a temperatura média do período ($^{\circ}C$), ND é o numero de dias do período e K é o fator de ajuste que varia com a temperatura média anual (Ta) do local, de acordo com os limites estabelecidos na **Tabela 01**:

Tabela 01. Valor de K em relação à temperatura média anual (Ta , $^{\circ}C$)

Ta ($^{\circ}C$)	Valor de K	Ta ($^{\circ}C$)	Valor de K
<23,5	0,01	25,6 a 26,5	0,0115
23,6 a 24,5	0,0105	26,6 a 27,5	0,012
24,6 a 25,5	0,011	>27,5	0,013

Fonte: (CAMARGO, 1971¹⁴ *apud* CAMARGO; CAMARGO, 2000)

3.4.8. Método da Radiação Solar (1975)

Este método foi baseado no método de Makkink (1965)⁶, desenvolvido originalmente para as condições de umidade da Holanda, adaptado pelo boletim FAO-24 (DOORENBOS; PRUITT, 1975). Pela introdução de um coeficiente de correção da variação do vento e umidade, sua validação foi estendida para uma extensa faixa de condições climatológicas (SMITH; ALLEN; PEREIRA, 1996). A equação para a estimativa da ETo da forma

$$EToRad = co + cl \cdot (W \cdot R_s) \quad (63)$$

em que $EToRad$ é a evapotranspiração de referência ($mm.d^{-1}$) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice), W é o fator que representa a fração de R_s que é utilizada na ETo (eq. 57), R_s é a radiação solar ($mm.d^{-1}$, eq. 58) estimada pela equação (40), co

= $-0,3 \text{ mm.d}^{-1}$ e cl são obtidos através da equação desenvolvida Frevert, Hill e Braaten (1983) para evitar o uso de namogramas:

$$cl = 1,0656 - 0,12795 \cdot 10^{-2} \cdot UR + 0,044953 \cdot U_2 - 0,2033 \cdot 10^{-3} \cdot UR \cdot U_2 - 0,31508 \cdot 10^{-4} \cdot UR^2 - 0,11026 \cdot 10^{-2} \cdot UR^2 \quad (64)$$

sendo UR , a umidade relativa diária (%) e U_2 , a velocidade média do vento medida a 2 m de altura (m.s^{-1}).

3.4.9. Método de Blaney-Criddle (1975)

Este método foi apresentado no princípio da década de 1950 para o oeste dos EUA, na região semi-árida dos estados de Novo México e Texas. O método encontrou ampla aplicação nos estudos de irrigação e foi adaptado como método Blaney-Criddle FAO-24 para uma ampla faixa de condições climatológicas (DOORENBOS; PRUITT, 1975), pela introdução de um fator de correção, que pode ser determinado a partir de estimativas de umidade, vento e incidência de raios solares (SMITH; ALLEN; PEREIRA, 1996).

A equação original de Blaney-Criddle para a estimativa da ET_o é dada por:

$$ET_{oBC} = p \cdot (0,46 \cdot T_{med} + 8,13) \quad (65)$$

em que ET_{oBC} é a evapotranspiração de referência (mm.d^{-1}) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice), T_{med} é a temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$) e p é a porcentagem diária média de luz em função da latitude e época do ano. Os valores de p interpolados para a latitude da estação estão disponíveis na **Tabela 02**.

Tabela 02. Fator p de Blaney-Criddle, em função da latitude e época do ano, para as latitudes 20° e 25° sul e interpolado para a latitude do local deste estudo.

Latitude Sul/Mês	20°	21,235°	25°
Janeiro	0,30	0,302	0,31
Fevereiro	0,29	0,290	0,29
Março	0,28	0,280	0,28
Abril	0,26	0,260	0,26
Mai	0,25	0,250	0,25
Junho	0,25	0,248	0,24
Julho	0,25	0,248	0,24
Agosto	0,26	0,260	0,26
Setembro	0,27	0,270	0,27
Outubro	0,28	0,282	0,29
Novembro	0,29	0,292	0,30
Dezembro	0,30	0,302	0,31

Fonte: (DOOREMBOS; PRUITT, 1977).

O boletim FAO 24 descreve uma revisão da equação de Blaney-Criddle, em que foram introduzidos elementos da cultura de referência, para facilitar os cálculos e automatizá-los, inserindo um coeficiente c que multiplica a equação original (DOOREMBOS; PRUITT, 1977). O coeficiente c é igual a um coeficiente “ $a + b$ ” que por sua vez é função da umidade relativa mínima mensal (UR_{min} , %), da razão de insolação média mensal (n/N), e da velocidade média do vento a 2 m de altura (U_2 , $m.s^{-1}$). Frevert, Hill e Braaten (1983) adaptaram as modificações da FAO, para evitar o uso de nomogramas, para as equações:

$$ET_o = c \cdot f \quad (66)$$

$$f = p \cdot (0,46 \cdot T_{med} + 8,13) \quad (67)$$

$$a = 0,0043 \cdot UR_{min} - \frac{n}{N} - 1,41 \quad (68)$$

$$b = 0,81917 - 0,0040922 \cdot UR_{min} + 1,0705 \cdot \frac{n}{N} + 0,065649 \cdot U_2 - 0,0059684 \cdot UR_{min} \cdot \frac{n}{N} - 0,0005967 \cdot UR_{min} \cdot U_2 \quad (69)$$

A nova versão da fórmula de Blaney-Criddle incluiu umidade e velocidade do vento, o que minimizou suas limitações. Nesta metodologia substituiu-se a umidade relativa mínima do ar (UR_{min}) para a umidade relativa média do ar (UR), por limitações dos dados fornecidos.

A equação de Blaney-Criddle não é recomendada para regiões equatoriais em que a temperatura se mantém estável, oscilando somente as demais variáveis meteorológicas. Para pequenas ilhas e áreas costeiras, onde a temperatura do ar é afetada pela temperatura da superfície do mar, tendo pouco efeito para a mudança periódica da radiação. Para altitudes elevadas, devido à temperatura média diária ser, razoavelmente, baixa (noites frias), até mesmo quando os níveis de radiação solar diária são altos. Em climas com larga variabilidade em horas de brilho solar durante a mudança dos meses (climas de monção, climas de latitudes médias durante a primavera e o outono, etc) (Doorenbos; Pruitt, 1975).

3.4.10. Método de Linacre (1977)

Este método empírico foi testado para as condições climatológicas da Austrália, e foi uma simplificação da metodologia de Penman-Monteith. É bem simples e estima a evapotranspiração de referência também com base na temperatura, mas em função da latitude e longitude (LINACRE, 1977). A ET_o para esta metodologia é estimada pela equação

$$ET_{oLin} = \frac{500 \cdot \left(\frac{T_{med} + 0,006 \cdot h}{100 - \varphi} \right) + 15 \cdot (T_{med} - T_{po})}{(80 - T_{med})} \quad (70)$$

ET_{oLin} é a evapotranspiração de referência ($mm.d^{-1}$) (a estimativa para período mensal e quinzenal encontra-se em apêndice), T_{med} é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$), h é a altitude local (m), φ é a latitude em módulo ($graus$), e_s é a pressão de vapor na temperatura T_{med} ($mmHg$), e UR é a umidade relativa média do ar (%), T_{po} é a temperatura média no ponto de orvalho ($^{\circ}C$), que pode ser aproximado pela equação:

$$Tpo = \frac{237,3 \cdot \text{Log}(e_a) - 156,8}{8,16 - \text{Log}(e_a)} \quad (71).$$

3.5. ÍNDICES ESTATÍSTICOS DE COMPARAÇÃO

Para a análise comparativa entre diferentes metodologias, utiliza-se índices estatísticos de comparação em relação alguma metodologia considerada padrão, por exemplo, o método de Penman-Monteith ou medidas do lisímetro. Camargo e Sentelhas (1997) sugerem os seguintes índices estatísticos: precisão - coeficiente de correlação de Pearson r ; exatidão - índice de Willmott d ; e de confiança ou desempenho de Camargo c .

O índice de Willmott, que representa a concordância ou exatidão (d), é calculado pela expressão:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [(P_i - O) + (O_i - O)]^2} \right] \quad (72)$$

O índice de correlação de Pearson, que representa a precisão (r), pode ser calculado por esta equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O) \cdot (P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - P)^2}} \quad (73)$$

O índice c , proposto por Camargo (CAMARGO; SENTELHA, 1997) para expressar a confiança ou desempenho, é obtido por:

$$c = r \cdot d \quad (74)$$

Nessas equações, P_i é o valor estimado, O_i é o valor observado e O é a média dos valores observados. O valor observado é aquele tomado como referência para os demais. O índice d varia de 0 a 1, em que o valor 1 significa uma perfeita exatidão entre os dados estimados e o adotado como padrão, enquanto que o valor 0 significa que não há concordância entre os valores analisados.

Camargo e Sentelhas (1997) propõem uma interpretação do desempenho, a partir do índice c , em uma tabela que julga de péssimo a ótimo o desempenho da ET_o . (**Tabela 03**)

Tabela 03. Critérios de interpretação do coeficiente c de Camargo.

Valor de " c "	Desempenho	Valor de " c "	Desempenho
$> 0,85$	Ótimo	0,51 a 0,60	Sofrível
0,76 a 0,85	Muito Bom	0,41 a 0,50	Mau
0,66 a 0,75	Bom	$\leq 0,40$	Péssimo
0,61 a 0,65	Mediano		

Fonte: (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

A classificação de Camargo é exigente, para se obter a qualificação máxima. É necessário índices de correlação e concordância quase perfeitos, até mesmo para qualificação “Muito Bom” os índices de Pearson e Willmott devem ser grandes, muito difícil de satisfazer.

Além dos métodos estatísticos acima apresentados, valeu-se de outros índices tais como: o erro quadrado médio (EQM), o erro máximo (EM), o erro aleatório (Ea) e o erro sistemático (Es), que são apresentados a seguir:

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \quad (75)$$

$$EM = \max(|O_i - P_i|)_i^n \quad (76)$$

$$Ea = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - P^*)^2 \quad (77)$$

$$Es = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P^* - O_i)^2 \quad (78)$$

sendo N o número de estimativas. Para o caso de Ea e Es , o valor de P^* é dado por:

$$P^* = a + b \cdot Oi \quad (79)$$

em que a e b são estimados por regressão linear simples com Pi no lugar do Y e Oi no lugar do X , pelo método dos mínimos quadrados.

Entretanto, é preferível que as interpretações de EQM , Es e Ea sejam processadas examinando-se as suas raízes quadradas ($REQM$ – erro médio; REa – raiz quadrada do erro aleatório; REs – raiz quadrada do erro sistemático), uma vez que assim são definidas em mm pluviométrico, mesma unidade de medida de Oi e Pi .

3.6. AJUSTE LOCAL DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA ET_o

Devido à especificidade de alguns modelos e o caráter empírico, as equações apresentam distinção em relação à medida observada. Numa tentativa de calibrar os modelos localmente, elaborou-se um ajuste com o auxílio dos modelos de auto-regressão, tendo como referência a evapotranspiração medida em lisímetro e na equação de Penman-Monteith.

Inicialmente, realizou-se uma análise estatística das equações descritas na metodologia e a ET_{oLis} , bem como para a na equação de Penman-Monteith, para o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2006. A fim de comparar posteriormente aos ajustes realizados nas equações.

3.6.1. Ajuste local das equações empíricas por AR dos ruídos

Considerando que as metodologias de estimativa da ETo descrevem o fenômeno, e se supõe que a diferença entre estas metodologias e os dados medidos advém de erros sistemáticos que podem estar auto-correlacionados. Estabeleceu-se, então, uma média para todas as quinzenas e também para os meses do período, de forma a se obter um ano médio de observações de $EToLis$ ($\overline{EToLis}$). Ano médio vem a ser a média da estimativa ou medida da ETo para a frequência escolhida no período desejado, por exemplo a média dos meses de janeiro para o período de 2002 a 2006, ou da primeira quinzena de janeiro para o mesmo período. O ano médio de evapotranspiração lisimétrica foi subtraído ano a ano das equações de estimativa da ETo , resultando em ruídos que foram analisados e ajustados ao modelo AR. A equação ajustada assume a seguinte característica:

$$ETo_{ar(t)} = ETo_t + (c_t + \phi_t R_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (80)$$

sendo ETo_t a evapotranspiração estimada pelas equações a serem ajustadas, $ETo_{ar(t)}$ é a ETo ajustada localmente, ε_t é um erro totalmente aleatório (deve ser desconsiderado para o cálculo, devido a sua insignificância), c_t uma constante, ϕ_t outra constante que modifica o ruído R_{t-1} que é a diferença entre o mês ou quinzena do ano médio $\overline{EToLis}_{t-1}$ e ETo_{t-1} da metodologia a ser ajustada calculada para o instante $t-1$ (imediatamente anterior), tal como a equação demonstrada:

$$R_{t-1} = \overline{EToLis}_{t-1} - ETo_{t-1} \quad (81)$$

Da mesma forma, estabeleceu-se um ajuste utilizando a equação de Penman-Monteith como referência, calculada com R_s estimado e velocidade média do vento a 2 m (U_2), como padrão ($EToPMRss$). Assim sendo a equação do ruído toma a seguinte forma:

$$R_{t-1} = \overline{EToPMR_{ss}}_{t-1} - ETo_{t-1} \quad (82)$$

em que $\overline{EToPMR_{ss}}$ é o ano médio para a $EToPMR_{ss}$, calculado para períodos quinzenais e mensais, no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2006 e demonstrado na **Tabela 04**.

Tabela 04. Média das estimativas da $EToPMR_{ss}$ ($\overline{EToPMR_{ss}}$), para os períodos quinzenais e mensais, de janeiro de 2002 a dezembro de 2006.

Mês	Quinzenas	$\overline{EToPMR_{ss}}$	Mês	Quinzenas	$\overline{EToPMR_{ss}}$	Mês	$\overline{EToPMR_{ss}}$
JAN	1	61,4	JUL	1	34,0	JAN	126,7
	2	65,3		2	39,2	FEV	120,6
FEV	1	63,8	AGO	1	44,5	MAR	123,8
	2	56,8		2	57,2	ABR	102,9
MAR	1	64,2	SET	1	57,4	MAI	79,1
	2	59,6		2	58,9	JUN	67,8
ABR	1	54,0	OUT	1	63,2	JUL	73,3
	2	48,9		2	72,6	AGO	101,7
MAI	1	39,3	NOV	1	72,2	SET	116,3
	2	36,6		2	68,7	OUT	135,8
JUN	1	34,5	DEZ	1	62,8	NOV	132,8
	2	33,8		2	76,1	DEZ	138,8

Com o objetivo de validar posteriormente o modelo, não foi utilizado o ano de 2001 na análise *AR* e *FAC*, para que após a realização do ajuste pudesse se valer deste ano de dados para comprovar a possível efetividade dos ajustes locais realizados nas metodologias.

3.6.2. Ajuste local das equações empíricas por regressão linear

Para realizar este ajuste, estabeleceu-se uma regressão linear entre a série de dados de *ETo* medida por lisímetro, que foi tomada como referência, e as demais metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência. A equação ajustada tomou a seguinte forma:

$$ETo_{rg} = \beta_0 + \beta_1 \cdot ETo \quad (83)$$

sendo ETo a evapotranspiração estimada pelas equações a serem ajustadas, ETo_{rg} a ETo ajustada localmente, β_0 a constante de regressão que representa o intercepto da reta com o eixo dos Y , β_1 o coeficiente de regressão que representa a variação de Y em função da variação de uma unidade da variável X .

Foi realizado este mesmo ajuste tomando a série de ETo estimados pela equação de Penman-Monteith (ETo_{PMRss}) como referência, para o estabelecimento da nova equação por regressão linear.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de evapotranspiração de referência (ET_o), determinados pelas diversas metodologias de cálculo, foram analisados com o intuito de comparar as equações e definir o modelo mais adequado à região estudada, tomando a medida por lisímetro de drenagem como padrão (ET_{oLis}). Visando adequar as equações empíricas às condições da área de estudo foi realizado um ajuste estatístico a partir da ET_{oLis} , por ser uma medida direta e por isso caracterizar melhor o fenômeno localmente. Da mesma forma, as equações foram analisadas com relação à equação de Penman-Monteith FAO-56, por ser uma metodologia reconhecida e utilizada em todo mundo, por estimar a ET_o a partir dos processos físicos envolvidos e não de forma empírica (ALLEN *et al.*, 1998), neste caso visou-se estabelecer uma equação que fosse de cálculo mais simples e com bom desempenho, para facilitar a estimativa na região.

4.1. DADOS OBSERVADOS NO LISÍMETRO

Em geral, as medidas da ET_{oLis} em período mensal mostraram-se mais consistentes em comparação com o período quinzenal, pois há uma diferença visível de uma quinzena para outra, o que não deveria ocorrer em períodos tão curtos em que as variáveis meteorológicas não são tão distintas. A forma como se conduziu o monitoramento do lisímetro dificultou a análise dos dados. Optou-se em não irrigar os evapotranspirômetros em períodos pré-

estabelecidos (diariamente, quinzenalmente, mensalmente...), de forma que, para calcular a ET_o , foi necessário fixar alguns períodos a partir da entrada de água no aparelho e uma drenagem mínima, estabelecida como sendo após um período de no mínimo de três dias sem irrigação ou chuva. Em consequência, parte da drenagem do período anterior é computada no período atual, superestimando a ET_o do período anterior, e consequentemente subestimando a atual. Também, ocasionalmente nos longos períodos sem irrigação ou precipitação (maiores que um mês) pode não ter ocorrido a manutenção necessária da capacidade de campo do solo, para que houvesse evapotranspiração em condição potencial (No **Apêndice A** encontra-se um extrato da planilha com o cálculo efetuado para a determinação da ET_{oLis}).

Para o preenchimento das falhas dos dados de ET_{oLis} , foi feita uma regressão entre a ET_o medida em lisímetro e os dados de entrada do evapotransporímetro, ou seja, o somatório dos dados de precipitação mais a irrigação administrada nos períodos sem chuvas ($P+I_r$). Pois foi encontrada uma grande correlação entre os dados de entrada do lisímetro e a evapotranspiração lisimétrica (eq. 14 e 15), como se observado nos gráficos das **Figuras 10 e 11**.

Figura 10. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro (ET_{oLis} , mm) e a soma entre a Precipitação e a Irrigação ($P+I$, mm), em período quinzenal.

Figura 11. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro ($EToLis$, mm) e a soma entre a Precipitação e a Irrigação ($P+I$, °C), em período mensal.

O ano de 2003 foi o único que não apresentou problemas de transbordamento da drenagem, por isso esse ano foi escolhido para demonstrar a relação entre a $EToLis$ e $P+I$. O gráfico da **Figura 12** apresenta a evapotranspiração medida no lisímetro comparado aos dados precipitação mais irrigação, em período quinzenal. A boa correlação ($r = 0,72$ para todos os anos estudados e $r = 0,83$ apenas para 2003) justifica o uso dos dados de $P+I$ para o preenchimento das falhas, há apenas uma pequena diferença nos períodos de grande precipitação, em que a $EToLis$ não apresenta correlação tão boa com $P+Ir$.

Na segunda quinzena de março há uma queda brusca na $P+I$ e por consequência na $EToLis$, indicando uma falha no monitoramento, nesta quinzena houve déficit hídrico, o solo, provavelmente, ficou abaixo da capacidade de campo, faltando água para que houvesse evapotranspiração.

Figura 12. Comparação da evapotranspiração de referência medida no lisímetro (*EToLis*, mm) e a soma da precipitação e irrigação (*P+I*, mm), em período quinzenal.

4.2. ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS

Comparando, inicialmente, a evapotranspiração lisimétrica com os dados meteorológicos, verificou-se uma baixa correlação linear com estas variáveis. Os parâmetros que apresentaram melhores resultados foram os de *Tmed* e *R_s*, com índice de correlação *r* de 0,33 e 0,15, em período quinzenal, e em período mensal 0,40 e 0,19, respectivamente. Entretanto, essa baixa correlação era esperada, considerando que a *ETo* é um fenômeno que ocorre por influência conjunta de vários fatores, e não uma ação linear de uma única variável de grande importância.

Na comparação entre a *EToLis* e a variável *Tmed* pode se notar uma grande dispersão principalmente nos valores de alta evapotranspiração e também de altas temperaturas, principalmente na faixa entre 23 e 25°C. (Vide **Figura 13**).

Figura 13. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro ($EToLis$, mm) e a Temperatura média do ar ($Tmed$, °C), em período quinzenal.

Para o período mensal não há muita diferença na dispersão (Vide **Figura 13**). Pode-se observar uma relação semelhante ao período quinzenal. Nota-se a mesma relação entre os dados de alta temperatura média mensal e alta taxa de $EToLis$.

Figura 14. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro ($EToLis$, mm) e a Temperatura média do ar ($Tmed$, °C), em período mensal.

Para a relação entre a R_s e $EToLis$ (**Figuras 15 e 16**), tanto para o período quinzenal como mensal, observa-se apenas uma leve tendência crescente: quanto maiores os valores de radiação solar global maior a ETo lisimétrica. Entretanto, a correlação é muito baixa, como demonstra o coeficiente $r = 0,15$.

Figura 15. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro ($EToLis$, mm) e a radiação solar global (R_s , $MJ.m^{-2}.d^{-1}$), em período quinzenal.

Figura 16. Relação entre a evapotranspiração de referência medida no lisímetro ($EToLis$, mm) e a radiação solar global (R_s , $MJ.m^{-2}.d^{-1}$), em período mensal.

4.3. ESTIMATIVAS DE ET_o COMPARADAS ÀS MEDIÇÕES LISIMÉTRICAS

A evapotranspiração observada em lisímetros tem a característica de ser uma medida direta deste fenômeno natural. Uma metodologia que permita estimá-la de uma forma mais

simples é muito importante para estudos diversos, tanto na agricultura quanto na engenharia de recursos hídricos.

Muitas das metodologias foram visualmente discrepantes em relação à medida da evapotranspiração por lisímetro tanto para período mensal quanto quinzenal. Quando se compara a *EToLis* com a *EToPMRss*, em período quinzenal (**Figura 17**), observa-se uma discrepância principalmente nos períodos de maior precipitação, período de maior fonte de erro no monitoramento do evapotranspirômetro. Na maior parte do tempo a estimativa de Penman-Monteith subestima a *ETo*, os índices estatísticos de comparação foram medianos em estimativa quinzenal ($r = 0,61$; $d = 0,66$; $c = 0,40$). Percebe-se também a mesma inconsistência para o período mensal ($r = 0,65$; $d = 0,72$; $c = 0,47$).

Em estimativa quinzenal, pode-se observar a variação que ocorre de uma quinzena para outra na *EToLis*, fato que é amenizado na medida da *ETo* lisimétrica em período mensal (**Figura 18**), mas que não melhora os índices estatísticos de comparação.

Figura 17. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETaPMRss* e a medida da *ETaLis*, em período quinzenal.

Figura 18. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETToPMRss* e a medida da *ETToLis*, em período mensal.

A *ETToPMRso* tem um comportamento semelhante à *ETToPMRss*, mas esta subestima ainda mais a *ETToLis*, tanto para período quinzenal quanto mensal (**Figuras 19 e 20**), e apresenta índices de comparação ainda piores ($r = 0,53$; $d = 0,51$; $c = 0,27$ em estimativa quinzenal e $r = 0,57$; $d = 0,55$; $c = 0,31$ em estimativa mensal). Na comparação entre estas duas metodologias, no **Capítulo 4.4**, esta constatação será mais bem observada.

Figura 19. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETToPMRso* e a medida da *ETToLis*, em período quinzenal.

Figura 20. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToPMRso* e a medida da *EToLis*, em período mensal.

A estimativa pela equação de Thornthwaite também alcançou um desempenho médio em comparação à *EToLis* ($c = 0,41$). Mesmo sendo função apenas da *Tmed* e da latitude local, a correlação é tão boa quanto a *EToPMRss*, no entanto ainda assim insatisfatório comparado à medida lisimétrica, além de subestimar a *ETo* na maior parte do período analisado (**Figura 21**). Não se estimou em período quinzenal por recomendação em bibliografia (THORNTHWAIT, 1948).

Figura 21. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToTho* e a medida da *EToLis*, em período mensal.

A metodologia de Camargo alcançou um dos melhores índices estatísticos (quinzenal - $r = 0,68$; $d = 0,63$; $c = 0,43$; mensal - $r = 0,68$; $d = 0,74$; $c = 0,50$), mas ainda assim abaixo do satisfatório. A metodologia subestima a *ETo* na maior parte do período e encontra discrepância principalmente nas épocas de maior precipitação, tal como nas metodologias anteriores (Figuras 22 e 23).

Figura 22. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToCam* e a medida da *EToLis*, em período quinzenal.

Figura 23. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToCam* e a medida da *EToLis*, em período mensal.

A estimativa pelo método de Makkink (*EToMak*) é melhor para os períodos de estiagem, no entanto, como nas metodologias anteriores, também subestima a *ETo* para maior

parte do período estudado, e apresenta índices estatísticos medianos (quinzenal - $r = 0,58$; $d = 0,51$; $c = 0,30$; mensal - $r = 0,63$; $d = 0,56$; $c = 0,35$), tanto em estimativa mensal quanto quinzenal (**Figuras 24 e 25**).

Figura 24. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETOMak* e a medida da *ETOLis*, em período quinzenal.

Figura 25. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETOMak* e a medida da *ETOLis*, em período mensal.

A *EToRad*, que estima a evapotranspiração de referência pelo método da Radiação FAO-24, superestimou a *ETOLis* na maior parte do período de estudo (**Figuras 26 e 27**), mesmo nos meses de maior precipitação, em que os métodos anteriores estiveram aquém da medida lisimétrica. Esta metodologia também não obteve bons índices de desempenho e

correlação (quinzenal - $r = 0,54$; $d = 0,50$; $c = 0,27$; mensal - $r = 0,58$; $d = 0,45$; $c = 0,26$). Apesar de ser uma metodologia baseada na equação de Makkink, a metodologia da Radiação FAO-24 tem uma estimativa muito distinta. A adaptação feita deveria tornar esta metodologia utilizável a uma gama maior de situações de contorno, no entanto para esta região de estudo não se mostrou aplicável (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

Figura 26. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToRad* e a medida da *EToLis*, em período quinzenal.

Figura 27. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToRad* e a medida da *EToLis*, em período mensal.

A equação de Jensen-Haise, superestima a *EToLis* (**Figuras 28 e 29**). O método apresenta correlação e precisão insatisfatória (quinzenal - $r = 0,60$; $d = 0,64$; mensal - $r =$

0,61; $d = 0,63$). A equação foi estabelecida para áreas irrigada de áreas áridas e semi-áridas, onde a necessidade hídrica de uma planta é muito grande, daí o motivo de uma estimativa mais alta. Outra explicação é devido a simplicidade da equação de Jensen-Haise que não permite que ela tenha uma faixa muito grande de condições climatológicas em que possa ser utilizada.

Figura 28. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToJH* e a medida da *EToLis*, em período quinzenal.

Figura 29. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToJH* e a medida da *EToLis*, em período mensal.

A estimativa da *ETo* pela metodologia de Linacre não obteve uma boa amplitude de valores, entendida aqui como a diferença entre a maior e a menor estimativa, em relação à

EToLis, ou seja, não alcança as medidas de evapotranspiração de referência medida em lisímetro quando estas são altas e tampouco quando estão baixas (**Figuras 30 e 31**). Também não possui sensibilidade quanto à sazonalidade que normalmente desempenha a *ETo*, pois a estimativa decresce nos períodos de alta precipitação onde deveria aumentar, por isso uma péssima exatidão (quinzenal – $d = 0,29$; mensal – $d = 0,29$) e correlação (quinzenal – $r = 0,22$; mensal – $r = 0,20$). Apesar do autor da metodologia recomendá-la para variadas condições climatológicas, esta foi testada inicialmente em condições de aridez na Austrália, condições distintas às deste estudo (LINACRE, 1977).

Figura 30. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToLin* e a medida da *EToLis*, em período quinzenal.

Figura 31. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToLin* e a medida da *EToLis*, em período mensal.

Semelhante ao método de Linacre, a metodologia do Blaney-Criddle também estima valores baixos de *ET_o* nos períodos de maior precipitação, quando deveria aumentar como ocorre na *ET_{oLis}*, o que por consequência resulta em péssimos índices de comparação (quinzenal - $r = 0,23$; $d = 0,22$; $c = 0,05$; mensal - $r = 0,30$; $d = 0,29$; $c = 0,09$). Isso é incoerente para a sazonalidade normalmente encontrada nesta região, sem contar que subestima a estimativa por quase todo o período calculado (**Figura 32 e 33**). Há uma recomendação para não se usar esta metodologia em latitudes médias, na primavera ou no outono, não é o caso característico do local de estudo, mas pode ser uma resposta para tal anormalidade, outra é que os coeficientes de ajuste local da equação não lhe dão precisão quanto a especificidades de diversas condições climatológicas.

Figura 32. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ET_{oBC}* e a medida da *ET_{oLis}*, em período quinzenal.

Figura 33. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToBC* e a medida da *EToLis*, em período mensal.

A metodologia do Balanço de Energia (*EToBal*) apresenta os melhores resultados, comparados a *EToLis*, entre as metodologias já testadas, entretanto, mesmo tendo os melhores índices estatísticos (quinzenal - $r = 0,69$; $d = 0,79$; $c = 0,55$; mensal - $r = 0,71$; $d = 0,83$; $c = 0,59$), a *EToBal* não representa bem a *EToLis*, recebendo a qualificação “Sofrível” de acordo com a classificação segundo o índice “c” de Camargo. Esta metodologia estima bem a *ETo* nos períodos de seca, e tem problemas principalmente nos períodos de maior precipitação, em que, vale ressaltar, foi o período de maior dificuldade de operação do evapotransporímetro.

Não há uma excelente correlação entre a metodologia e a medida lisimétrica devida à alta variação periódica dos dados medidos no aparelho, o que indica uma falha no monitoramento (**Figuras 34 e 35**). Mas mesmo que os índices estatísticos demonstrem um desempenho “Sofrível”, para a *EToBal*, pode-se inferir que a radiação efetiva, que é o saldo de radiação efetivamente utilizado pela planta para a transpiração e é o que basicamente esta metodologia estima, tem grande importância para a evapotranspiração nesta região. Com uma ressalva de que o método simplifica a estimativa desta variável.

Figura 34. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToBal* e a medida da *EToLis*, em período quinzenal.

Figura 35. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToBal* e a medida da *EToLis*, em período mensal.

O método de Turc subestima a *ETo* em relação à *EToLis* na maior parte do período estudado (**Figura 36 e 37**), além de apresentar uma baixa sensibilidade quanto à sazonalidade das estações. Este método foi desenvolvido para a Europa ocidental, para condições de umidade relativa semelhantes ao local deste estudo, entretanto com temperaturas médias mais baixas, o que provavelmente influenciou a estimativa ruim e por isso índices estatísticos ruins (quinzenal - $r = 0,57$; $d = 0,34$; $c = 0,19$; mensal - $r = 0,62$; $d = 0,34$; $c = 0,21$).

Figura 36. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETOTrc* e a medida da *ETOLis*, em período quinzenal.

Figura 37. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETOTrc* e a medida da *ETOLis*, em período mensal.

Em geral, foi verificada uma baixa correlação entre os valores medidos de *ETo* em lisímetro e as estimativas pelas equações, tanto para períodos quinzenais quanto mensais. As **Tabelas 05 e 06** apresentam os índices estatísticos que relacionam os dados de *ETOLis* e as demais estimativas da *ETo*, em período quinzenal e mensal, respectivamente. As metodologias receberam classificação abaixo de “Sofrível” pelo índice *c* de Camargo, tendo a melhor estimativa pelo método do Balanço de Energia ($c = 0,55$ em estimativa quinzenal e $c = 0,59$ para estimativa mensal). Vale destacar que esta metodologia obteve um bom índice

de exatidão e um índice de correlação razoável, tanto em período quinzenal quanto mensal, e mesmo assim. Esse fato que sugere uma relação de dependência da *ETo* com a radiação efetiva na região, sendo este, talvez, o parâmetro mais importante para a área de estudo. Apesar da sensível melhora do período quinzenal para a mensal, o erro encontrado ainda é alto.

O *REQM* é, em muitos métodos, próximo ou maior que a metade da evapotranspiração esperada para um dia. O erro aleatório (*REa*) e principalmente o sistemático (*REs*), foram altos para todas as metodologias, de um terço à metade da *ETo* esperada para um dia, o que pode indicar que houve problemas de monitoramento do evapotranspirômetro.

Os índices de correlação das metodologias empíricas, a exceção dos métodos de Linacre e Blaney-Criddle, variaram entre 0,54 a 0,68 para estimativas quinzenais e 0,58 a 0,74 para estimativas mensais, uma faixa relativamente pequena, e todas estas metodologias obtiveram excelentes índices de correlação com o método de Penman-Monteith, que será discutido no **Capítulo 4.4**. Este fato reforça a idéia que pode ter havido problemas na operação do lisímetro, devido a boa relação destas metodologias com a de Penman-Monteith.

Outra fonte de erro é quanto a sensibilidade dos métodos empírico-teóricos de contabilizar a evaporação da água interceptada pela planta e que se acumula sobre ela. Pode-se inferir que os métodos que se valem de balanços hídricos contabilizam de forma indireta, todavia é uma variável de difícil controle.

Tabela 05. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToLis$ e as demais estimativas por equações em período quinzenal, de 2002 a 2006.

Equações	r	d	c	Classificação	$REQM$ (mm.d ¹)	EM (mm.d ¹)	REa (mm.d ¹)	REs (mm.d ¹)
<i>EToPMRss</i>	0,61	0,66	0,40	Péssimo	1,35	3,83	0,75	1,13
<i>EToPMRso</i>	0,53	0,51	0,27	Péssimo	1,64	4,42	0,66	1,90
<i>EToCam</i>	0,68	0,63	0,43	Mau	1,52	3,79	0,67	1,37
<i>EToMak</i>	0,58	0,51	0,30	Péssimo	1,52	4,32	0,54	1,42
<i>EToRad</i>	0,54	0,50	0,27	Péssimo	2,02	5,23	1,01	1,74
<i>EToJH</i>	0,60	0,64	0,38	Péssimo	1,62	4,85	0,99	1,28
<i>EToLin</i>	0,22	0,29	0,06	Péssimo	1,61	3,92	0,76	1,42
<i>EToBC</i>	0,23	0,22	0,05	Péssimo	1,79	4,93	0,68	1,66
<i>EToBal</i>	0,67	0,79	0,55	Sofrível	1,21	3,85	1,01	0,68
<i>EToTrc</i>	0,57	0,34	0,19	Péssimo	1,95	5,04	0,44	1,90

Tabela 06. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToLis$ e as demais estimativas por equações em período mensal, de 2002 a 2006.

Equações	r	d	c	Classificação	$REQM$ (mm.d ¹)	EM (mm.d ¹)	REa (mm.d ¹)	REs (mm.d ¹)
<i>EToPMRss</i>	0,65	0,72	0,47	Mau	1,03	2,64	0,67	0,78
<i>EToPMRso</i>	0,57	0,55	0,31	Péssimo	1,31	3,20	0,64	1,14
<i>EToTho</i>	0,69	0,60	0,41	Mau	1,41	3,17	0,67	1,24
<i>EToCam</i>	0,74	0,68	0,50	Mau	1,22	2,84	0,60	1,07
<i>EToMak</i>	0,63	0,56	0,35	Péssimo	1,18	2,92	0,46	1,09
<i>EToRad</i>	0,58	0,45	0,26	Péssimo	1,87	4,02	0,85	1,66
<i>EToJH</i>	0,63	0,61	0,38	Péssimo	1,44	3,54	0,85	1,16
<i>EToLin</i>	0,20	0,29	0,06	Péssimo	1,30	2,69	0,68	1,11
<i>EToBC</i>	0,30	0,29	0,09	Péssimo	1,46	3,79	0,58	1,34
<i>EToBal</i>	0,71	0,83	0,59	Sofrível	0,96	2,66	0,92	0,28
<i>EToTrc</i>	0,62	0,34	0,21	Péssimo	1,65	3,71	0,37	1,61

Esperava-se que a *ETo* observada no lisímetro concordasse pelo menos com a estimativa encontrada pela equação de Penman-Monteith FAO-56, como descrito em alguns trabalhos anteriores (CAMARGO, 1962; PERES; PEREIRA; FRIZZONE, 1995; CAMARGO; SENTELHAS, 1997; SENTELHAS, 1998; PEREIRA, 1998; KASHYAP;

PANDA, 2001; VILLAMAN *et al*, 2001; MARTÍNEZ-COB; TEJERO-JUSTE, 2004; PEREIRA; PRUITT, 2004; LÓPES-URREA *et al*, 2006). Deve-se salientar que muitos destes trabalhos tiveram condições ambientais e aparelhos lisimétricos distintos das deste estudo, no entanto isto não desqualifica a conclusão que há muitas distinções entre a *EToLis* e a metodologia de Penman-Monteith. Também era esperado que a evapotranspiração lisimétrica (*EToLis*) tivesse melhor desempenho com a equação de Thornthwaite como descrito por Camargo (1962), Camargo e Sentelhas (1997) e Mattos (1997) no estado de São Paulo, mas também não se verificou.

Allen, Pruitt e Jensen (1991) defendem que deve haver boa concordância entre a estimativa de Penman-Monteith e os valores encontrados por lisímetro, sendo que a não constatação desse resultado infere em problemas no monitoramento do lisímetro. Sedyama (1991) adverte que há muitas dificuldades em se manter o evapotranspirômetro em condições ideais, tanto da parte interna quanto externa do aparelho, além das dificuldades instrumentais associadas, o que por consequência traz erro à observação.

A fim de comprovar se o procedimento para preenchimento das falhas inseriu um erro ainda maior à *ETo* medida por lisímetro, comparou-se a *EToLis* com as demais estimativas da *ETo* calculadas, eliminando em todas as metodologias as quinzenas ou meses em que a *EToLis* apresentou falhas. Mas mesmo esta comparação mostrou-se ruim, sem bons índices de comparação e erro, variando em uma sensível melhora para alguns métodos e piora para outros, em relação à comparação feita anteriormente, como se pode observar na **Tabela 07** e **Tabela 08**.

Tabela 07. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToLis$ e demais estimativas da ETo em período quinzenal, sem os períodos em que houve falha nos dados de $EToLis$, de 2002 a 2006.

Equações	r	d	c	Classificação	$REQM$ (mm.d ⁻¹)	EM (mm.d ⁻¹)	REa (mm.d ⁻¹)	REs (mm.d ⁻¹)
<i>EToPMRss</i>	0,60	0,70	0,42	Mau	1,21	3,77	0,76	0,94
<i>EToPMRso</i>	0,54	0,59	0,32	Péssimo	1,38	4,42	0,63	1,56
<i>EToCam</i>	0,64	0,65	0,42	Mau	1,36	3,79	0,70	1,17
<i>EToMak</i>	0,59	0,58	0,34	Péssimo	1,29	4,16	0,53	1,17
<i>EToRad</i>	0,56	0,46	0,26	Péssimo	2,16	5,23	0,99	1,92
<i>EToJH</i>	0,59	0,59	0,35	Péssimo	1,61	3,92	0,81	1,40
<i>EToLin</i>	0,36	0,42	0,15	Péssimo	2,73	5,37	1,48	2,29
<i>EToBC</i>	0,25	0,29	0,07	Péssimo	1,57	5,02	0,69	1,41
<i>EToBal</i>	0,61	0,75	0,46	Mau	1,24	3,85	1,03	0,69
<i>EToTrc</i>	0,48	0,48	0,23	Péssimo	1,61	4,89	1,18	2,48

Tabela 08. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToLis$ e demais estimativas da ETo em período mensal, sem os períodos em que houve falha nos dados de $EToLis$, de 2002 a 2006.

Equações	r	d	c	Classificação	$REQM$ (mm.d ⁻¹)	EM (mm.d ⁻¹)	REa (mm.d ⁻¹)	REs (mm.d ⁻¹)
<i>EToPMRss</i>	0,63	0,74	0,47	Mau	0,95	2,42	0,70	0,64
<i>EToPMRso</i>	0,58	0,64	0,37	Péssimo	1,12	2,82	0,69	0,88
<i>EToTho</i>	0,63	0,63	0,40	Péssimo	1,32	2,83	0,75	1,09
<i>EToCam</i>	0,69	0,68	0,47	Mau	1,14	2,69	0,63	0,95
<i>EToMak</i>	0,61	0,61	0,37	Péssimo	1,01	2,90	0,47	0,90
<i>EToRad</i>	0,59	0,42	0,25	Péssimo	2,01	4,02	0,88	1,84
<i>EToJH</i>	0,63	0,58	0,37	Péssimo	1,51	3,54	0,86	1,24
<i>EToLin</i>	0,42	0,45	0,19	Péssimo	1,37	2,69	0,74	1,15
<i>EToBC</i>	0,44	0,52	0,23	Péssimo	1,13	3,47	0,63	0,95
<i>EToBal</i>	0,63	0,77	0,49	Mau	1,04	2,66	0,96	0,39
<i>EToTrc</i>	0,62	0,43	0,27	Péssimo	1,37	3,71	0,40	1,32

Os resultados obtidos no presente estudo indicam que as atuais metodologias de operação dos lisímetros não permitem a determinação da evapotranspiração de referência com boa confiabilidade. Tanto a dificuldade em se operar o evapotransporímetro em períodos

chuvosos, devido a transbordamento da drenagem, quanto em manter o solo em capacidade de campo nos períodos secos, introduziram falhas nas séries de dados observados. O preenchimento dessas falhas e a correta determinação da *EToLis* em períodos quinzenal e mensal mostraram-se inviáveis. Devido a esta constatação, não se utilizou a medida lisimétrica da *ETo* como padrão para o ajuste local das demais metodologias analisadas.

4.4. ESTIMATIVAS DA *ETo* COMPARADAS À *EToPMRss*

Há um reconhecimento mundial com relação à equação de Penman-Monteith quando se trata em estimar a evapotranspiração (ALLEN *et al.*, 1998), por estimar a *ETo* pelos seus processos físicos principais, a radiação efetiva e os processos aerodinâmicos. No entanto, é uma equação de cálculo difícil e os muitos parâmetros envolvidos requerem uma quantidade grande de instrumentação. A comparação desta metodologia com outras metodologias mais simples torna-se interessante para facilitar a estimativa local com menos dados, sendo de grande ganho para os pequenos agricultores da região. Um ajuste destas metodologias também é interessante para que se aproximem mais da estimativa tomada como referência.

Na estimativa da *ETo* pela equação de Penman-Monteith, optou-se pela *EToPMRss*, pois foi a que mais se aproximou da *EToLis* (mesmo que fracamente). Neste método, a radiação solar global (R_s) foi estimada a partir de dados de horas de insolação (n) e a latitude local (ϕ). A mesma metodologia que foi utilizada para as equações que possuem radiação solar global (R_s) em suas estimativas.

As estimativas da *ETo* para as metodologias testadas não apresentaram grandes diferenças com relação ao período de análise (quinzenal e mensal).

As variações testadas da metodologia de Penman-Monteith apresentaram diferenças mínimas. *EToPMRss_U10* obteve uma superestimativa média desprezível (4,3% para período quinzenal e 4,0% para período mensal) em comparação à *EToPMRss* (Figura 38 e 39). Os excelentes índices estatísticos de comparação (quinzenal - $r = 0,98$; $d = 0,98$; $c = 0,96$; mensal - $r = 0,98$; $d = 0,98$; $c = 0,96$) indicam a boa adequação da equação (37), que estima a velocidade do vento a 2 m a partir de valores observado a 10 m do solo.

Figura 38. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToPMRss_U10* e a estimativa da *EToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 39. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToPMRss_U10* e a estimativa da *EToPMRss*, em período mensal.

No entanto, quando se variou a radiação solar global houve uma diferença mais notória. Considerando a R_s medida, tende a subestimar (em média 6,5% para quinzenal e mensal) a ET_o comparada à R_s calculada, na metodologia de Penman-Monteith (**Figuras 40 e 41**). Quando se acrescenta a U_{10} transportada para U_2 (**Figuras 42 e 43**), a divergência encontrada é ainda maior (11,2% e 10,8%, quinzenal e mensal, respectivamente), entretanto os índices de comparação encontrados foram bons, para ET_oPMRso em período quinzenal- $r = 0,93$; $d = 0,96$; $c = 0,89$ e em período mensal $r = 0,92$; $d = 0,96$; $c = 0,88$, e para ET_oPMRso_U10 em período quinzenal- $r = 0,95$; $d = 0,94$; $c = 0,89$ e em período mensal $r = 0,95$; $d = 0,94$; $c = 0,89$.

Figura 40. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da ET_oPMRso e a medida da ET_oPMRss , em período quinzenal.

Figura 41. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ET0PMRso* e a estimativa da *ET0PMRss*, em período mensal.

Figura 42. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ET0PMRso_U10* e a estimativa da *ET0PMRss*, em período quinzenal.

Figura 43. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToPMRso_U10* e a estimativa da *EToPMRss*, em período mensal.

A metodologia de Thornthwaite apresentou uma boa correlação ($r = 0,93$) em comparação à *EToPMRss*, a exatidão no entanto não é tão boa ($d = 0,85$), por isso apresentou uma considerável subestimativa média (20,5%), que ocorre principalmente nos meses de maio a agosto, em que evapotranspiração é mais baixa (**Figura 44**). Mas é uma estimativa qualificada como “Muito Bom” pela classificação de Camargo. É uma aproximação satisfatória, considerando que esta metodologia é função apenas da temperatura.

Figura 44. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToTho* e a estimativa da *EToPMRss*, em período mensal.

A metodologia de Camargo apresentou um desempenho ainda melhor, o que poderia se esperar, pois foi uma equação que teve como base metodologia de Thornthwaite (**Figuras 45 e 46**). A *ETo* foi subestimada em média a *ETo* em 12,2% para estimativa quinzenal e 12,4% para período mensal. Nos dois casos obtive excelentes índices de comparação (quinzenal - $r = 0,90$; $d = 0,89$; $c = 0,80$; mensal - $r = 0,93$; $d = 0,90$; $c = 0,84$).

Figura 45. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToCam* e a estimativa da *EToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 46. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToCam* e a estimativa da *EToPMRss*, em período mensal.

A *EToMak* apresentou a estimativa mais próxima da *EToPMRss* (Figuras 47 e 48), com subestimativa média baixa (7,0%, tanto quinzenal quanto mensal), que ocorre principalmente nos períodos de alta *ETo*, nos meses de novembro a maio. Não tem a mesma amplitude de valores que a *EToPMRss*, pois superestima nos períodos secos e subestima nos chuvosos, no entanto mesmo assim obteve excelentes índices de comparação (quinzenal – $r = 0,95$; $d = 0,92$; $c = 0,87$; mensal – $r = 0,97$; $d = 0,92$; $c = 0,89$).

Figura 47. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETToMak* e a estimativa da *ETToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 48. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETToMak* e a estimativa da *ETToPMRss*, em período mensal.

A *ETToRad* apresentou um desempenho ruim com relação à *ETToPMRss*, apesar da excelente correlação ($r = 0,95$ e $0,96$, para estimativa quinzenal e mensal, respectivamente). No entanto a exatidão da equação é ruim ($d = 0,50$ e $0,46$, para estimativa quinzenal e mensal, respectivamente), a ponto de superestimar a *ETo* em 55% tanto em períodos mensais quanto quinzenais (**Figuras 49 e 50**).

Figura 49. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToRad* e a estimativa da *EToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 50. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToRad* e a estimativa da *EToPMRss*, em período mensal.

O método de Jensen-Haise proporcionou uma estimativa ruim em comparação à *EToPMRss*, uma vez que superestima, em média, a *ETo* em 41,2% para períodos quinzenais e 41,3% para mensais (**Figuras 51 e 52**). Apesar de ter uma excelente correlação ($r = 0,96$ e $0,97$ para estimativa mensal e quinzenal, respectivamente), seus valores apresentam uma exatidão ruim ($d = 0,64$ e $0,61$ para estimativa mensal e quinzenal, respectivamente). Esta equação foi concebida para regiões áridas e semi-áridas dos Estados Unidos, região em que a água requerida para um cultivo é maior que para uma região de clima úmido.

Figura 51. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETtoJH* e a estimativa da *ETtoPMRss*, em período quinzenal.

Figura 52. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETtoJH* e a estimativa da *ETtoPMRss*, em período mensal.

Em comparação com a estimativa de evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (*ETtoPMRss*), a metodologia de Linacre apresenta deficiências nos períodos secos, em que a *ETo* é superestimada (**Figuras 53 e 54**), por isso a correlação e o desempenho foram ruins ($r = 0,59$ e $0,56$ e $c = 0,34$ e $0,29$ para estimativa mensal e quinzenal, respectivamente). Nos períodos chuvosos, de novembro a fevereiro, as estimativas são mais consistentes. Em média, a metodologia de Linacre superestima a *ETtoPMRss* em 22,1% nos períodos quinzenais e 22,5% nos períodos mensais.

Figura 53. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToLin* e a estimativa da *EToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 54. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToLin* e a estimativa da *EToPMRss*, em período mensal.

Similar ao método de Linacre, o método de Blaney-Cridley também não apresenta estimativa crescente nos períodos de alta *ETo*. No entanto a *EToBC* aproxima-se mais da *EToPMRss* nos períodos de menor taxa de evapotranspiração (**Figuras 55 e 56**), esta irregularidade na estimativa da *EToBC* provoca a correlação ruim ($r = 0,75$ e $0,72$ para estimativa quinzenal e mensal, respectivamente). A *EToBC* não tem a mesma amplitude de valores que possui a *ETo* tomada como referência e ainda assim subestima em média a evapotranspiração de referência em 11,7% em períodos quinzenais e 11,3% em estimativas mensais.

Figura 55. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToBC* e a estimativa da *EToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 56. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToBC* e a estimativa da *EToPMRss*, em período mensal.

A metodologia do Balanço de Energia estima muito bem a *ETo* em comparação com a metodologia usada como referência, por ser parte da equação de Penman-Monteith, sem os efeitos do poder evaporante do ar. A *EToBal* apresentou índices estatísticos muito bons ($r = 0,91$; $d = 0,90$; $c = 0,82$ para períodos quinzenais e $r = 0,89$; $d = 0,92$; $c = 0,82$ para estimativas mensais), o que demonstra a grande importância da radiação efetiva tem no processo de evapotranspiração. Em média a *EToBal* superestima a *EToPMRss* em 10,2% em período quinzenal e 9,9% em estimativa mensal. A superestimativa dá-se principalmente nos períodos de alta *ETo*, que coincide com os meses de maior incidência de R_s (**Figuras 57 e 58**).

Figura 57. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToBal* e a estimativa da *EToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 58. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToBal* e a estimativa da *EToPMRss*, em período mensal.

A metodologia de Turc não tem uma boa amplitude de valores para *ETo* em comparação com a estimativa de *ETo* tomada como referência (**Figuras 59 e 60**). A metodologia subestima muito a *ETo* nos meses de setembro a fevereiro, período de maior taxa de evapotranspiração de referência, os valores são subestimados em média em 23,9%, tanto para estimativa quinzenal quanto mensal. O método apresenta excelente correlação com a *EToPMRss* ($r = 0,95$ e $0,96$ para estimativa quinzenal e mensal, respectivamente), porém o

coeficiente de exatidão é ruim ($d = 0,66$ e $0,63$ para estimativa quinzenal e mensal, respectivamente), isso demonstra a importância de se analisar uma metodologia não apenas com base na correlação, mas também através de outras formas de análise comparativa, como coeficiente de exatidão, concordância ou desempenho.

Figura 59. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETToTrc* e a estimativa da *ETToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 60. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *ETToTrc* e a estimativa da *ETToPMRss*, em período mensal.

As variações das formas como se calculou a *ETo* pelo método de Penman-Monteith apresentam boa classificação (*EToPMRss_U10*, *EToPMRso_U10* e *EToPMRso*) segundo o índice de desempenho de Camargo, assim como as estimativas da *EToMak*, *EToTho*, *EToBal*. As estimativas *EToRad*, *EToJH* e *EToTrc* apresentaram boa correlação, mas exatidão ruim e

as estimativas *EToLin* e *EToBC* não apresentaram boa correlação e tampouco exatidão. Quanto maior o índice *c*, menor o erro médio encontrado, relação que, em média, também se observa para os demais índices de erro. Tal como os índices estatísticos de comparação, não houve muita diferença entre os índices de erro para as estimativas quinzenais e mensais (Tabelas 09 e 10).

A maioria dos métodos empíricos utilizam o cálculo do balanço de energia valendo-se da radiação solar global, enquanto o método de Penman-Monteith estima e utiliza em sua metodologia a radiação líquida. Esta simplificação causa erro imprecisão aos mesmos.

Tabela 09. Coeficiente de correlação (*r*), índice de concordância (*d*) e de desempenho (*c*), classificação segundo índice *c*, erro médio (*REQM*), erro máximo (*EM*), raiz do erro sistemático (*REs*) e raiz do erro aleatório (*REa*), entre a *EToPMRss* e demais estimativas da *ETo* em período quinzenal, de 2002 a 2006.

Equações	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	Classificação	<i>REQM</i> (mm.d ⁻¹)	<i>EM</i> (mm.d ⁻¹)	<i>REa</i> (mm.d ⁻¹)	<i>REs</i> (mm.d ⁻¹)
<i>EToPMRss_U10</i>	0,98	0,98	0,96	Ótimo	0,26	0,86	0,19	0,17
<i>EToPMRso_U10</i>	0,94	0,95	0,89	Ótimo	0,66	1,63	0,33	0,57
<i>EToPMRso</i>	0,96	0,93	0,89	Ótimo	0,49	1,16	0,26	0,42
<i>EToCam</i>	0,90	0,89	0,80	Muito Bom	0,61	1,49	0,39	0,47
<i>EToMak</i>	0,95	0,92	0,87	Ótimo	0,45	1,16	0,20	0,40
<i>EToRad</i>	0,95	0,50	0,48	Mau	2,06	3,23	0,37	2,03
<i>EToJH</i>	0,96	0,64	0,61	Mediano	1,57	2,58	0,34	1,54
<i>EToLin</i>	0,59	0,58	0,34	Péssimo	1,14	2,66	0,63	0,95
<i>EToBC</i>	0,75	0,78	0,59	Sofrível	0,76	1,28	0,48	0,60
<i>EToBal</i>	0,91	0,90	0,82	Muito Bom	0,74	1,37	0,56	0,47
<i>EToTrc</i>	0,95	0,66	0,63	Mediano	1,00	1,82	0,17	0,98

Tabela 10. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMR_{ss}$ e demais estimativas da ETo em período mensal, de 2002 a 2006.

Equações	r	d	c	Classificação	$REQM$ (mm.d ⁻¹)	EM (mm.d ⁻¹)	REa (mm.d ⁻¹)	REs (mm.d ⁻¹)
$EToPMR_{ss_U_{10}}$	0,98	0,98	0,96	Ótimo	0,25	0,78	0,18	0,17
$EToPMR_{so_U_{10}}$	0,94	0,95	0,89	Ótimo	0,63	1,44	0,30	0,55
$EToPMR_{so}$	0,96	0,92	0,88	Ótimo	0,47	0,93	0,36	0,14
$EToTho$	0,93	0,85	0,79	Muito Bom	0,73	1,35	0,34	0,65
$EToCam$	0,93	0,90	0,84	Muito Bom	0,56	1,23	0,32	0,46
$EToMak$	0,97	0,92	0,89	Ótimo	0,43	0,84	0,15	0,40
$EToRad$	0,96	0,46	0,44	Mau	2,04	2,76	0,28	2,03
$EToJH$	0,97	0,61	0,59	Sufrível	1,55	2,17	0,27	1,52
$EToLin$	0,56	0,52	0,29	Péssimo	1,12	2,23	0,57	0,96
$EToBC$	0,72	0,74	0,53	Sufrível	0,74	1,21	0,42	0,61
$EToBal$	0,95	0,89	0,85	Muito Bom	0,71	1,24	0,52	0,49
$EToTrc$	0,96	0,63	0,60	Sufrível	0,98	1,57	0,13	1,97

4.5. ANÁLISE DE AUTO-CORRELAÇÃO DO RUÍDO ENTRE A $EToPMR_{ss}$ E DEMAIS ESTIMATIVAS DA ETo

O ajuste local das equações de estimativa da evapotranspiração tem grande importância. Devido ao caráter empírico destas metodologias, elas não são recomendadas para uma faixa muito ampla de condições climatológicas. No entanto, na origem de seu desenvolvimento, possuíam uma boa estimativa. Sugere-se, então, um ajuste local destas metodologias a partir da ETo pelo método de Penman-Monteith, que tem sua estimativa recomendada por órgãos internacionais (ALLEN *et al.*, 1998). Propôs-se uma auto-regressão apenas do erro encontrado (ruído), entre a média da metodologia tomada como referência ($EToPMR_{ss}$) e as demais metodologias analisadas. Espera-se encontrar uma pequena equação

que somada à equação empírica, a ajustará localmente, como descrito na metodologia do

Capítulo 3.6.

Para chegar a um ajuste das equações analisadas, inicialmente submeteu-se os ruídos entre as metodologias de estimativa da ETo e a $\overline{EToPMRss}$, como descreve a equação (82), a uma análise de auto-correlação para posterior auto-regressão destes ruídos.

Como descrito na equação (80), o ajuste proposto é função da média para os períodos quinzenais e mensais da estimativa da $EToPMRss$ ($\overline{EToPMRss}$). Estes valores estão demonstrados na **Tabela 04**.

A partir dos ruídos calculados (R) pela subtração da $\overline{EToPMRss}$ pelas demais metodologias empíricas (equação 82), foi testada a auto-correlação e suas funções estão representadas nos gráficos das **Figuras de 61 a 77**, com limites de 5% de significância para a hipótese que a correlação seja igual a zero. No entanto, nenhuma das funções caracterizou-se perfeitamente como uma função de auto-correlação. Algumas apresentaram decaimento, mas com picos de crescimento ($EToTho$, $EToCam$ e $EToMak$). Outras apresentaram sazonalidade ($EToLin$, $EToBC$, $EToBal$ e $EToTrc$), que teoricamente deveriam ter sido extinguida com a subtração da média das estimativas por $EToPMRss$ ($\overline{EToPMRss}$).

A função de auto-correlação (FAC) do ruído da $EToTho$ apresenta um pouco de sazonalidade e evolui mais como um gráfico de crescimento do que decaimento (**Figura 61**).

Figura 61. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a *EToTho* e *EToPMRss*, em período mensal.

A *FAC* do ruído da *EToCam* não apresenta uma sazonalidade evidente tão pouco um gráfico decrescente (**Figuras 62 e 63**)

Figura 62. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a *EToCam* e *EToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 63. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a *EToCam* e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.

A função de auto-correlação para o ruído entre a *EToMak* e a *ETo* tomada como referência foi muito semelhante à *FAC* da *EToCam*. Os ruídos da equação de Makkink tiveram picos maiores comparados aos ruídos da equação de Camargo (**Figuras 64 e 65**).

Figura 64. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a *EToMak* e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.

Figura 65. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a *EToMak* e *EToPMRss*, em período mensal.

Os ruídos a partir da estimativa da *EToRad* apresentaram uma função de auto-correlação sem sazonalidade mas também sem nenhum padrão evidente (**Figuras 66 e 67**).

Figura 66. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a *EToRad* e *EToPMRss*, em período quinzenal.

Figura 67. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a *EToRad* e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.

Assim como os ruídos a partir da estimativa da *EToRad*, os ruídos da *EToJH* apresentaram uma função de auto-correlação sem sazonalidade mas também sem nenhum padrão evidente (**Figuras 68 e 69**).

Figura 68. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a *EToJH* e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.

Figura 69. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToJH$ e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.

Os ruídos para as estimativas da $EToLin$, $EToBC$, $EToBal$ e $EToTrc$ apresentaram FAC com sazonalidade e decaimento muito discreto (**Figuras 70 a 77**), tais quais as outras metodologias sem uma auto-correlação característica.

Figura 70. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToLin$ e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.

Figura 71. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToLin$ e $EToPMRss$, em período mensal.

Figura 72. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToBC$ e $EToPMRss$, em período quinzenal.

Figura 73. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToBC$ e $EToPMRss$, em período mensal.

Figura 74. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToBal$ e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.

Figura 75. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToBal$ e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.

Figura 76. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToTrc$ e $\overline{EToPMRss}$, em período quinzenal.

Figura 77. Função de auto-correlação, com limite de significância de 5%, para o ruído obtido entre a $EToTrc$ e $\overline{EToPMRss}$, em período mensal.

Nenhuma das equações testadas apresentou uma função de auto-correlação clara de seus ruídos subtraídos da $\overline{EToPMRss}$. Mas mesmo não apresentando essa característica principal para o estabelecimento de uma auto-correlação, a análise de auto-regressão dos ruídos foi realizada e alcançou-se bons resultados para algumas metodologias, como demonstrada no capítulo que segue.

4.6. ANÁLISE DE AUTO-REGRESSÃO E AJUSTE LOCAL DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVAS DA ETo

Apesar da ausência de uma função de auto-correlação clara, aplicou-se a AR para o ruído entre as metodologias e a $\overline{EToPMRss}$, de acordo com a proposta inicial.

Partindo dos ruídos encontrados da subtração entre as metodologias de estimativa da ETo e a média da $EToPMRss$ para estimativas quinzenais e mensais ($\overline{EToPMRss}$), calculou-

se a auto-regressão, de acordo com a metodologia descrita nos **Capítulos 2.8.1. e 3.6.**, dando origem às novas equações ajustadas, que tomaram a seguinte forma:

- Em período quinzenal

$$EToCam_{ar} = EToCam + \left[0,3491 + 4,3727 \cdot (EToCam_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (84)$$

$$EToMak_{ar} = EToMak + \left[2,4696 + 0,3778 \cdot (EToMak_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (85)$$

$$EToRad_{ar} = EToRad + \left[-30,4741 - 0,0051 \cdot (EToRad_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (86)$$

$$EToJH_{ar} = EToJH + \left[-21,4593 + 0,0573 \cdot (EToJH_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (87)$$

$$EToLin_{ar} = EToLin + \left[-3,5133 + 0,6966 \cdot (EToLin_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (88)$$

$$EToBC_{ar} = EToBC + \left[3,0271 + 0,5981 \cdot (EToBC_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (89)$$

$$EToBal_{ar} = EToBal + \left[-2,2315 + 0,8192 \cdot (EToBal_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (90)$$

$$EToTrc_{ar} = EToTrc + \left[5,0003 + 0,6298 \cdot (EToTrc - \overline{EToPMRss})_{t-1} \right] \quad (91)$$

- Em período mensal:

$$EToTho_{ar} = EToTho + \left[9,25 + 0,0716 \cdot (EToTho_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (92)$$

$$EToCam_{ar} = EToCam + \left[10,545 + 0,2238 \cdot (EToCam_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (93)$$

$$EToMak_{ar} = EToMak + \left[5,623 + 0,2704 \cdot (EToMak_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (94)$$

$$EToRad_{ar} = EToRad + \left[-74,96 - 0,2769 \cdot (EToRad_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (95)$$

$$EToJH_{ar} = EToJH + \left[-54,947 - 0,2094 \cdot (EToJH_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (96)$$

$$EToLin_{ar} = EToLin + \left[-11,288 + 0,5234 \cdot (EToLin_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (97)$$

$$EToBC_{ar} = EToBC + \left[7,454 + 0,4272 \cdot (EToBC_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (98)$$

$$EToBal_{ar} = EToBal + \left[-4,137 + 0,6581 \cdot (EToBal_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (99)$$

$$EToTrc_{ar} = EToTrc + \left[11,143 + 0,6088 \cdot (EToTho_{t-1} - \overline{EToPMRss}_{t-1}) \right] \quad (100)$$

4.7. ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E AJUSTE LOCAL DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVAS DA ET_o

Efetuiu-se, também, outra forma de ajuste local por regressão linear simples, visando a comparação desta forma com a proposta de ajuste por AR do ruído entre as metodologias e a $\overline{ET_oPMR_{ss}}$.

As equações encontradas estão demonstradas abaixo:

- Em período quinzenal

$$ET_oCam_{rg} = ET_oCam \cdot 0,9369 + 9,8065 \quad (98)$$

$$ET_oMak_{rg} = ET_oMak \cdot 1,3479 - 13,987 \quad (99)$$

$$ET_oRad_{rg} = ET_oRad \cdot 0,752 - 9,1062 \quad (100)$$

$$ET_oJH_{rg} = ET_oJH \cdot 0,7403 - 2,5194 \quad (101)$$

$$ET_oLin_{rg} = ET_oLin \cdot 0,7225 + 6,4912 \quad (102)$$

$$ET_oBC_{rg} = ET_oBC \cdot 0,9865 + 7,0957 \quad (103)$$

$$ET_oBal_{rg} = ET_oBal \cdot 0,6342 + 16,621 \quad (104)$$

$$ET_oTrc_{rg} = ET_oTrc \cdot 1,6574 - 14,393 \quad (105)$$

- Em período mensal

$$ET_oTho_{rg} = ET_oTho \cdot 0,8787 + 30,427 \quad (106)$$

$$ET_oCam_{rg} = ET_oCam \cdot 0,9227 + 21,13 \quad (107)$$

$$ET_oMak_{rg} = ET_oMak \cdot 1,4472 - 38,251 \quad (108)$$

$$ET_oRad_{rg} = ET_oRad \cdot 0,8146 - 29,023 \quad (109)$$

$$EToJH_{rg} = EToJH \cdot 0,7786 - 11,013 \quad (110)$$

$$EToLin_{rg} = EToLin \cdot 0,709 + 14,441 \quad (111)$$

$$EToBC_{rg} = EToBC \cdot 1,0463 + 7,8567 \quad (112)$$

$$EToBal_{rg} = EToBal \cdot 0,6144 + 35,716 \quad (113)$$

$$EToTrc_{rg} = EToTrc \cdot 1,7686 - 38,198 \quad (114)$$

4.8. ESTIMATIVAS DA *ETo* AJUSTADAS LOCALMENTE COMPARADAS À *EToPMRss*

A partir das equações ajustadas, foram realizadas novas estimativas e análises comparativas com a estimativa de Peman-Monteith (*EToPMRss*) tomada como referência.

A equação de Thornthwaite ajustada localmente por *AR* dos ruídos apresentou um grande ganho na precisão e no desempenho do modelo ($r = 0,93$; $d = 0,94$; $c = 0,87$), quando comparada à *EToPMRss*. A *EToTho_{ar}* subestimou em média a *ETo* tomada como referência em apenas 8,4% (**Figura 78**). Entretanto, a comparação do ajuste por regressão linear possui um ajuste tão bom quanto à por *EToTho_{ar}*. A equação *EToTho_{rg}* apresenta ganho em precisão e desempenho melhor ($r = 0,93$; $d = 0,96$; $c = 0,89$) e subestimativa média praticamente nula, comparada a *EToPMRss*.

Figura 78. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToTho_{ar}$, da $EToTho_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.

A equação de Camargo após ajuste local por AR dos ruídos também apresentou um grande ganho em precisão na estimativa da ETo ($d = 0,95$ e $0,97$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente). A estimativa que já era boa tornou-se ainda melhor ($c = 0,86$ e $0,91$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente). Após o ajuste, a metodologia apresentou em média uma subestimativa pequena da ETo , comparada a $EToPMR_{ss}$ ($0,2\%$ e $0,5\%$ para as estimativas quinzenal e mensal, respectivamente) (**Figuras 79 e 80**). O ajuste por regressão linear apresentou os mesmos índices de comparação para estimativa quinzenal e um pouco inferior para a estimativa mensal ($r = 0,93$; $d = 0,96$; $c = 0,89$), mas a subestimativa média é nula para os dois períodos de estimativa.

Figura 79. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToCam_{ar}$, da $EToCam_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.

Figura 80. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToCam_{ar}$, da $EToCam_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.

A $EToMak_{ar}$ teve um ajuste quase perfeito. A precisão e o desempenho melhoraram ($d = 0,96$ e $0,96$; $c = 0,90$ e $0,92$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente), e a subestimativa foi eliminada (0% e $0,1\%$ para estimativa quinzenal e mensal, respectivamente). Esse resultado é importante, pois a equação de Makkink é mais simples de calcular que a de Penman-Monteith (**Figuras 81 e 82**). O ajuste para regressão linear foi ainda melhor, apresentou índices de comparação melhores que o outro ajuste ($r = 0,95$; $d = 0,98$; $c = 0,93$ para estimativa quinzenal e $r = 0,97$; $d = 0,98$; $c = 0,95$ para estimativa mensal) e não apresenta sub ou superestimativa média, tanto para a estimativa quinzenal quanto mensal.

Figura 81. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToMakar$, da $EToMakrg$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.

Figura 82. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToMakar$, da $EToMakrg$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.

A metodologia da Radiação Solar ajustada por AR dos ruídos teve um ganho excelente em precisão ($d = 0,96$ e $0,97$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente) e por isso também em desempenho ($c = 0,91$ e $0,94$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente). A correlação da equação da Radiação Solar já era boa, necessitava apenas um ajuste para obter uma boa estimativa (**Figuras 83 e 84**). Devido à melhora no desempenho, a subestimava média ocorrida foi praticamente nula para a estimativa quinzenal e 2,5% para a estimativa mensal. No entanto, como nos ajustes anteriores, o ajuste por regressão linear teve índices de comparação tão bons quanto o ajuste por AR dos ruídos

($r = 0,95$; $d = 0,97$; $c = 0,92$ para estimativa quinzenal e $r = 0,96$; $d = 0,98$; $c = 0,94$ para estimativa mensal) e sub ou superestimativa nula.

Figura 83. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToRad_{ar}$, da $EToRad_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.

Figura 84. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToRad_{ar}$, da $EToRad_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.

O método de Jensen-Haise ajustado localmente por AR dos ruídos ($EToJH_{ar}$) apresentou uma excelente melhora em relação à exatidão ($d = 0,96$ e $0,97$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente), ao desempenho ($c = 0,92$ e $0,94$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente), e por consequência em sua estimativa média comparada à $EToPMR_{ss}$, praticamente nula para a estimativa quinzenal e subestimativa de $0,3\%$ para período mensal. Assim como a $EToRad$, a estimativa por Jensen-Haise já possuía

uma boa correlação com a metodologia tomada como referência ($EToPMR_{ss}$), necessitando apenas de um bom ajuste local (**Figuras 85 e 86**). O ajuste por regressão linear foi ainda melhor, apresentando índices de comparação excelentes tanto em estimativa mensal quanto quinzenal ($r = 0,96$; $d = 0,98$; $c = 0,94$ para estimativa quinzenal e $r = 0,97$; $d = 0,98$; $c = 0,95$ para estimativa mensal).

Figura 85. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToJH_{ar}$, da $EToJH_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.

Figura 86. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToJH_{ar}$, da $EToJH_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.

Com o ajuste da metodologia de Linacre por AR dos ruídos, obteve-se uma melhora nos índices, tanto de exatidão quanto de correlação ($d = 0,84$ e $0,75$; $r = 0,84$ e $0,75$ para

estimativas quinzenais e mensais, respectivamente), a estimativa quinzenal superestimou em média a ETo em apenas 1,3% e 0,3% para mensal. No entanto, apesar da melhora nos índices de comparação, o desempenho da equação não foi ideal ($c = 0,76$ e $0,64$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente) (**Figuras 87 e 88**). O ajuste por regressão linear não alcançou bons resultados, ainda pior comparados ao ajuste por AR dos ruídos, apresentando índices menos satisfatórios ($r = 0,60$; $d = 0,64$; $c = 0,41$ para estimativa quinzenal e $r = 0,56$; $d = 0,65$; $c = 0,36$ para estimativa mensal).

Figura 87. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToLin_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.

Figura 88. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToLin_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.

Como ocorreu na equação de Linacre, a melhora observada após o ajuste por *AR* dos ruídos da metodologia de Blaney-Criddle foi boa em relação estimativa comparada à *EToPMR_{ss}*, em média a *EToBC_{ar}* superestimou em 0,7% em período quinzenal e 0,2% em mensal (**Figuras 89 e 90**). O índice de desempenho não teve a mesma melhora ($c = 0,78$ e $0,71$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente), provavelmente devido à baixa correlação que este método e o de Linacre tinham antes do ajuste. O ajuste por regressão linear também foi insatisfatório, com índices de comparação ruins ($r = 0,75$; $d = 0,84$; $c = 0,63$ para estimativa quinzenal e $r = 0,72$; $d = 0,82$; $c = 0,59$ para estimativa mensal).

Figura 89. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToBC_{ar}*, da *EToBC_{rg}* e a estimativa da *EToPMR_{ss}*, em período quinzenal.

Figura 90. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da *EToBC_{ar}*, da *EToBC_{rg}* e a estimativa da *EToPMR_{ss}*, em período mensal.

A estimativa da ET_o por Balanço de Energia já tinha uma boa correlação ($r = 0,91$ e $0,95$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente), e um bom desempenho ($d = 0,81$ e $0,85$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente). O ajuste por AR dos ruídos foi muito eficiente, diminuindo o erro que a metodologia tinha em períodos de alta evapotranspiração e apresentando um excelente índice de desempenho (c) igual a $0,89$ e $0,90$ para períodos quinzenais e mensais, respectivamente (**Figuras 91 e 92**). A ET_oBal_{ar} superestimou em média a estimativa da ET_o pela metodologia tomada como referência, $0,3\%$ em período quinzenal e $0,8\%$ em período mensal. O ajuste por regressão linear não foi tão bom quanto o ajuste anterior, mas foi igualmente eficiente com bons índices de comparação ($r = 0,91$; $d = 0,95$; $c = 0,86$ para estimativa quinzenal e $r = 0,92$; $d = 0,96$; $c = 0,88$ para estimativa mensal).

Figura 91. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da ET_oBal_{ar} , da ET_oBal_{rg} e a estimativa da ET_oPMR_{ss} , em período mensal.

Figura 92. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToBal_{ar}$, da $EToBal_{rg}$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.

A metodologia de Turc obteve um excelente ajuste por AR dos ruídos em relação à $EToPMR_{ss}$, também porque já apresentava uma boa correlação ($r = 0,95$ e $0,96$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente). A $EToTrc_{ar}$ subestimou em média, a ETo tomada como referência, para períodos quinzenais em $1,8\%$ e em períodos mensais superestimou em média $0,5\%$. O método de Turc ajustou-se bem tanto para estimativas quinzenais quanto a períodos mensais. Apesar dos excelentes índices de comparação ($r = 0,95$ e $0,94$; $d = 0,93$ e $0,95$; $c = 0,89$ e $0,89$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente), percebe-se graficamente que a $EToTrc_{ar}$ subestima levemente a ETo em períodos de alta taxa de evapotranspiração e superestima nos meses de baixa ETo (**Figuras 93** e **94**). O ajuste por regressão linear obteve índices de comparação tão bons quanto ao outro ajuste e com sub ou superestimativa nula ($r = 0,95$ e $0,96$; $d = 0,97$ e $0,98$; $c = 0,92$ e $0,94$ para estimativas quinzenais e mensais, respectivamente).

Figura 93. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToTrcar$, da $EToTrcg$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.

Figura 94. Comparação, no período de 2002 a 2006, entre a estimativa da $EToTrcar$, da $EToTrcg$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.

Em geral, todas as metodologias apresentaram melhoras com o ajuste realizado tanto por AR dos ruídos quanto por regressão linear, no entanto o ajuste por regressão linear foi melhor para a maioria das metodologias testadas, com melhoras nos índices de comparação e erros, e tem a vantagem de ser de mais simples aplicação. Entretanto nem todas tiveram seus desempenhos melhorados suficientemente a ponto de poder substituir a metodologia tomada como referência (**Tabelas 11 e 12**). Na maioria dos casos, o ajuste foi melhor para estimativas mensais que para períodos quinzenais.

Dentre as metodologias ajustadas por AR dos ruídos para estimativa quinzenal, pode se dar destaque à $EToCam_{ar}$, $EToMak_{ar}$, $EToRad_{ar}$, $EToJH_{ar}$, $EToBal_{ar}$ e $EToTrc_{ar}$, pois receberam a classificação “Ótimo”, segundo o índice de Camargo, e também apresentaram erros baixos. Para a estimativa mensal, acrescenta-se à lista a $EToTho_{ar}$, além das já citadas em estimativa quinzenal, pois também receberam a classificação “Ótimo” e apresentaram erros baixos.

Para as metodologias ajustadas por regressão linear destaca-se a $EToCam_{rg}$, $EToMak_{rg}$, $EToRad_{rg}$, $EToJH_{rg}$, $EToBal_{rg}$ e $EToTrc_{rg}$, com exceção da $EToBal_{rg}$ todos os métodos tiveram desempenho superior ao ajuste por AR dos ruídos em estimativa quinzenal. Fato também observado para estimativa mensal e acrescenta-se a lista, para este período, a $EToTho_{ar}$. Em geral, também é observado melhora nos índices de erro do ajuste por regressão linear para o outro.

Tabela 11. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMR_{ss}$ e demais estimativas da ETo ajustadas localmente em período quinzenal, de 2002 a 2007.

Equações	r	d	c	Classificação	$REQM$ ($mm.d^1$)	EM ($mm.d^1$)	REa ($mm.d^1$)	REs ($mm.d^1$)
$EToCam_{ar}$	0,91	0,95	0,86	Ótimo	0,40	1,04	0,38	0,14
$EToCam_{rg}$	0,91	0,95	0,86	Ótimo	0,40	1,05	0,36	0,18
$EToMak_{ar}$	0,94	0,96	0,90	Ótimo	0,34	1,11	0,26	0,22
$EToMak_{rg}$	0,95	0,98	0,93	Ótimo	0,28	0,96	0,27	0,09
$EToRad_{ar}$	0,95	0,96	0,91	Ótimo	0,42	1,21	0,86	0,79
$EToRad_{rg}$	0,95	0,97	0,92	Ótimo	0,29	1,01	0,28	0,09
$EToJH_{ar}$	0,96	0,96	0,92	Ótimo	0,70	1,99	0,48	0,50
$EToJH_{rg}$	0,96	0,98	0,94	Ótimo	0,55	1,26	0,36	0,41
$EToLin_{ar}$	0,84	0,91	0,76	Muito Bom	0,52	1,79	0,46	0,25
$EToLin_{rg}$	0,60	0,69	0,41	Mau	0,76	1,63	0,45	0,61
$EToBC_{ar}$	0,85	0,92	0,78	Muito Bom	0,50	1,34	0,45	0,22
$EToBC_{rg}$	0,75	0,84	0,63	Mediano	0,63	1,46	0,47	0,42
$EToBal_{ar}$	0,93	0,96	0,89	Ótimo	0,40	0,94	0,40	0,07
$EToBal_{rg}$	0,91	0,95	0,86	Ótimo	0,39	1,28	0,68	0,61
$EToTrc_{ar}$	0,93	0,95	0,88	Ótimo	0,37	1,42	0,28	0,24
$EToTrc_{rg}$	0,95	0,97	0,92	Ótimo	0,30	1,00	0,28	0,09

Tabela 12. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMR_{ss}$ e demais estimativas da ETo ajustadas localmente em período mensal, de 2002 a 2007.

Equações	r	d	c	Classificação	$REQM$ (mm.d ⁻¹)	EM (mm.d ⁻¹)	REa (mm.d ⁻¹)	REs (mm.d ⁻¹)
$EToTho_{ar}$	0,93	0,94	0,87	Ótimo	0,45	0,99	0,33	0,30
$EToTho_{rg}$	0,93	0,96	0,89	Ótimo	0,32	0,66	0,30	0,12
$EToCam_{ar}$	0,94	0,97	0,91	Ótimo	0,31	0,80	0,30	0,05
$EToCam_{rg}$	0,93	0,96	0,89	Ótimo	0,32	0,79	0,29	0,12
$EToMak_{ar}$	0,96	0,96	0,92	Ótimo	0,31	0,59	0,19	0,25
$EToMak_{rg}$	0,97	0,98	0,95	Ótimo	0,22	0,62	0,22	0,06
$EToRad_{ar}$	0,97	0,97	0,94	Ótimo	0,31	0,74	0,27	0,16
$EToRad_{rg}$	0,96	0,98	0,94	Ótimo	0,23	0,71	0,23	0,06
$EToJH_{ar}$	0,97	0,97	0,94	Ótimo	0,33	0,80	0,27	0,19
$EToJH_{rg}$	0,97	0,98	0,95	Ótimo	0,22	0,50	0,21	0,05
$EToLin_{ar}$	0,75	0,85	0,64	Mediano	0,58	1,41	1,79	1,48
$EToLin_{rg}$	0,56	0,65	0,36	Péssimo	0,73	1,40	0,41	0,60
$EToBC_{ar}$	0,81	0,88	0,71	Bom	0,51	1,22	0,40	0,32
$EToBC_{rg}$	0,72	0,82	0,59	Sofrível	0,61	1,14	0,44	0,42
$EToBal_{ar}$	0,95	0,95	0,90	Ótimo	0,43	1,55	0,37	0,21
$EToBal_{rg}$	0,92	0,96	0,88	Ótimo	0,35	1,09	0,32	0,14
$EToTrc_{ar}$	0,94	0,95	0,89	Ótimo	0,34	0,75	0,24	0,24
$EToTrc_{rg}$	0,96	0,98	0,94	Ótimo	0,24	0,57	0,23	0,06

A $EToRad_{ar}$ apresentou o melhor desempenho tanto em período quinzenal ($c = 0,91$) quanto em estimativa mensal ($r = 0,94$), indicando ser uma boa alternativa para a estimativa da evapotranspiração de referência. Para o ajuste por regressão linear em estimativa quinzenal a $EToJH_{rg}$ apresentou o melhor desempenho ($r = 0,94$) e em estimativa mensal destaca-se a $EToMak_{rg}$ e a $EToJH_{rg}$ para os melhores desempenhos ($r = 0,95$). No entanto todas as metodologias que obtiveram desempenho classificados como “Ótimo” são altamente recomendadas para substituir a estimativa de Penman-Monteith.

4.9. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PARA O ANO DE 2001

Como forma de averiguar a efetividade dos ajustes, estimou-se a ETo para o ano de 2001 com as equações em suas formas originais e ajustadas e as comparou com a $EToPMR_{ss}$ para este ano. O ano de 2001 foi deixado de fora da análise de auto-regressão propositalmente, para que se pudesse verificar se o ajuste seria eficiente fora do período considerado na AR dos ruídos e na regressão linear.

Nesta verificação, foram excluídas as metodologias que não obtiveram bons desempenhos de seus ajustes, são elas: $EToLin_{rg}$ e $EToBC_{rg}$ para a estimativa quinzenal e $EToLin_{ar}$, $EToLin_{rg}$, $EToBC_{ar}$ e $EToBC_{rg}$ para a estimativa mensal.

As estimativas das metodologias sem o ajuste local, para o ano de 2001, apresentaram coeficientes e erros estatísticos melhores que a média dos anos posteriores. Os gráficos do desempenho destas estimativas da ETo comparadas à $EToPMR_{ss}$, para este ano, estão abaixo apresentadas em conjunto com as estimativas ajustadas localmente para este mesmo ano (**Figuras 94 a 107**).

As metodologias de Thornthwaite, Camargo e Makkink ajustadas localmente, obtiveram desempenho semelhante aos anos posteriores, para o ano de 2001 (**Figuras 95 a 99**).

Figura 95. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToTho_{ar}$, da $EToTho_{rg}$, da $EToTho$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.

Figura 96. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToCam_{ar}$, da $EToCam_{rg}$, da $EToCam$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.

Figura 97. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToCam_{ar}$, da $EToCam_{rg}$, da $EToCam$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.

Figura 98. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToMakar$, da $EToMakrg$, da $EToMak$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.

Figura 99. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToMakar$, da $EToMakrg$, da $EToMak$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.

A $EToRad_{ar}$, para o ano de 2001, também continuou demonstrando um bom ajuste. No entanto ficou mais evidente, em comparação à $EToPMRss$, que a metodologia ajustada por AR dos ruídos subestima as baixas taxas de ETo calculada pela metodologia tomada como referência e superestima as quinzenas ou meses de maiores valores de evapotranspiração. Enquanto o ajuste por regressão linear tem um desempenho excelente com relação estimativa tomada como referência (**Figura 100 e 101**).

Figura 100. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToRad_{ar}$, da $EToRad_{rg}$, da $EToRad$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.

Figura 101. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToRad_{ar}$, da $EToRad_{rg}$, da $EToRad$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.

A $EToJH_{ar}$ apresentou desempenho semelhante à $EToRad_{ar}$, apenas apresentou uma estimativa um pouco inferior à evapotranspiração de referência estimada pelo método da Radiação Solar ajustada por AR dos ruídos, comparada a $EToPMRss$ (**Figura 102 e 103**). Todavia o ajuste por regressão linear foi excelente assim como a $EToRad$ ajustada da mesma maneira.

Figura 102. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToJH_{ar}$, da $EToJH_{rg}$, da $EToJH$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.

Figura 103. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToJH_{ar}$, da $EToJH_{rg}$, da $EToJH$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.

As metodologias de Linacre e de Blaney-Criddle ajustadas por AR dos ruídos demonstraram o mesmo desempenho que obtiveram nos anos de 2002 a 2006, mas para os dois casos pode-se observar graficamente uma variação muito grande quinzena a quinzena, o que mantêm a correlação mais baixa do que as outras metodologias ajustadas (**Figuras 104 e 105**).

Figura 104. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToLin$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.

Figura 105. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToLin$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.

Diferente de como ocorreu nos anos posteriores, a estimativa por Balanço de Energia ajustada por regressão linear, para o ano de 2001, foi tão boa quanto o ajuste por AR dos ruídos (Figuras 106 e 107).

Figura 106. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToBal_{ar}$, da $EToBal_{rg}$, da $EToBC$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período quinzenal.

Figura 107. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToBal_{ar}$, da $EToBal_{rg}$, da $EToBal$ e a estimativa da $EToPMR_{ss}$, em período mensal.

Dentre as equações ajustadas localmente a que obteve maior salto em melhoria foi a de Turc, obteve um grande ganho na precisão do método e por consequência no desempenho da estimativa, para as duas formas de ajustes propostas (**Figura 108 e 109**).

Figura 108. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToTrcar$, da $EToTrc$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período quinzenal.

Figura 109. Comparação, no ano de 2001, entre a estimativa da $EToTrcar$, da $EToTrc$ e a estimativa da $EToPMRss$, em período mensal.

As equações ajustadas para o ano de 2001 obtiveram as mesmas melhorias que observadas para os anos posteriores. A $EToRad_{ar}$ apesar da variação comentada anteriormente, teve índices de erros baixos, o que não impede a mesma de ser utilizada.

Tabela 13. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMR_{ss}$ e demais estimativas da ETo ajustadas localmente em período quinzenal, para o ano de 2001.

Equações	r	d	c	Classificação	$REQM$ ($mm.d^{-1}$)	EM ($mm.d^{-1}$)	REa ($mm.d^{-1}$)	REs ($mm.d^{-1}$)
$EToCam_{ar}$	0,96	0,98	0,94	Ótimo	0,24	0,53	0,24	0,04
$EToCam_{rg}$	0,96	0,98	0,94	Ótimo	0,26	0,55	0,24	0,09
$EToCam$	0,96	0,91	0,87	Ótimo	0,55	0,95	0,26	0,49
$EToMak_{ar}$	0,97	0,98	0,95	Ótimo	0,23	0,43	0,22	0,09
$EToMak_{rg}$	0,97	0,99	0,96	Ótimo	0,21	0,41	0,21	0,04
$EToMak$	0,97	0,94	0,91	Ótimo	0,38	0,64	0,16	0,35
$EToRad_{ar}$	0,97	0,96	0,94	Ótimo	0,38	1,01	0,28	0,26
$EToRad_{rg}$	0,97	0,98	0,95	Ótimo	0,22	0,45	0,21	0,04
$EToRad$	0,97	0,49	0,48	Mau	2,04	3,03	2,35	0,35
$EToJH_{ar}$	0,98	0,96	0,93	Ótimo	0,43	0,93	0,28	0,33
$EToJH_{rg}$	0,98	0,99	0,97	Ótimo	0,20	0,48	0,20	0,03
$EToJH$	0,98	0,63	0,62	Mediano	1,57	2,23	0,27	1,56
$EToLin_{ar}$	0,83	0,90	0,75	Bom	0,52	1,09	0,48	0,18
$EToLin$	0,61	0,55	0,33	Péssimo	0,98	2,07	0,43	0,88
$EToBC_{ar}$	0,85	0,92	0,78	Muito Bom	0,49	0,84	0,48	0,12
$EToBC$	0,76	0,74	0,57	Sofrível	0,74	1,26	0,39	0,63
$EToBal_{ar}$	0,95	0,96	0,91	Ótimo	0,42	0,84	0,36	0,22
$EToBal_{rg}$	0,95	0,98	0,93	Ótimo	0,27	0,61	0,26	0,03
$EToBal$	0,95	0,90	0,86	Ótimo	0,73	1,35	0,42	0,60
$EToTrc_{ar}$	0,96	0,98	0,94	Ótimo	0,25	0,58	0,24	0,09
$EToTrc_{rg}$	0,97	0,98	0,95	Ótimo	0,23	0,54	0,23	0,04
$EToTrc$	0,97	0,66	0,64	Mediano	0,99	1,40	0,14	0,98

Tabela 14. Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e de desempenho (c), classificação segundo índice c , erro médio ($REQM$), erro máximo (EM), raiz do erro sistemático (REs) e raiz do erro aleatório (REa), entre a $EToPMR_{ss}$ e demais estimativas da ETo ajustadas localmente em período mensal, para o ano de 2001.

Equações	r	d	c	Classificação	$REQM$ (mm.d ¹)	EM (mm.d ¹)	REa (mm.d ¹)	REs (mm.d ¹)
$EToTho_{ar}$	0,97	0,95	0,92	Ótimo	0,40	0,70	0,21	0,21
$EToTho_{rg}$	0,97	0,98	0,95	Ótimo	0,21	0,41	0,20	0,20
$EToTho$	0,97	0,84	0,82	Muito Bom	0,73	1,09	0,22	0,22
$EToCam_{ar}$	0,98	0,99	0,97	Ótimo	0,17	0,31	0,16	0,16
$EToCam_{rg}$	0,98	0,99	0,97	Ótimo	0,17	0,29	0,16	0,16
$EToCam$	0,98	0,91	0,90	Ótimo	0,52	0,75	0,18	0,18
$EToMak_{ar}$	0,99	0,98	0,97	Ótimo	0,20	0,29	0,10	0,10
$EToMak_{rg}$	0,99	0,99	0,98	Ótimo	0,15	0,32	0,14	0,14
$EToMak$	0,99	0,94	0,92	Ótimo	0,37	0,55	0,10	0,10
$EToRad_{ar}$	0,99	0,97	0,96	Ótimo	0,30	0,58	0,17	0,17
$EToRad_{rg}$	0,99	0,99	0,98	Ótimo	0,14	0,25	0,14	0,14
$EToRad$	0,99	0,46	0,46	Mau	2,02	2,40	2,33	2,33
$EToJH_{ar}$	0,97	0,96	0,93	Ótimo	0,42	0,67	0,27	0,27
$EToJH_{rg}$	0,98	0,99	0,97	Ótimo	0,16	0,34	0,33	0,33
$EToJH$	0,98	0,61	0,60	Sofrível	1,55	1,96	0,20	0,20
$EToBal_{ar}$	0,98	0,97	0,95	Ótimo	0,36	0,52	0,23	0,23
$EToBal_{rg}$	0,97	0,98	0,95	Ótimo	0,21	0,35	0,21	0,21
$EToBal$	0,97	0,90	0,87	Ótimo	0,71	1,12	0,34	0,34
$EToTrc_{ar}$	0,98	0,98	0,96	Ótimo	0,22	0,38	0,13	0,13
$EToTrc_{rg}$	0,99	0,99	0,98	Ótimo	0,15	0,32	0,14	0,14
$EToTrc$	0,99	0,63	0,62	Mediano	0,99	1,38	0,08	0,08

Nota-se que a metodologia proposta para ajuste local das equações por AR dos ruídos de ETo tem um grande ganho no desempenho, mas principalmente na exatidão (índice d de Willmott). As metodologias que possuíam uma boa exatidão mas uma correlação ruim, não resultaram em bons ajustes.

O ajuste por regressão linear, na maioria dos casos, estimou tão bem, ou melhor, a ETo tomada como referência quanto o ajuste por AR dos ruídos. O que torna este tipo de ajuste mais aconselhável pela simplicidade e pelos bons resultados. No entanto, para que o ajuste por regressão linear obtenha uma boa eficiência como o desejado, é necessário que a metodologia a ser ajustada possua uma excelente correlação com a metodologia tomada como

referência. Enquanto o ajuste por *AR* dos ruídos obteve melhorias nas metodologias ajustadas, mesmo não tendo excelente correlação, entretanto obteve maior eficiência quando esta excelente correlação era presente.

Todas as metodologias obtiveram excelentes ganhos com os ajustes, mas as metodologias de Turc, Jensen-Haise e da Radiação Solar foram as que melhor se adaptaram aos dois ajustes, devido à boa correlação que já possuíam anteriormente, para uma precisão ruim.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos deste estudo permitiram as seguintes conclusões:

As medidas lisimétricas da *ETo* não apresentaram desempenho satisfatório quando comparadas às estimativas quinzenais e mensais do método de Penman-Monteith.

A operação do lisímetro de drenagem em períodos de alta precipitação é difícil e requer cuidados especiais quanto à coleta do percolado. Também para períodos secos, deve-se ter cuidado especial em se manter a capacidade de campo do solo, objetivando a manutenção da evapotranspiração em condições potenciais.

A radiação efetiva é a variável ambiental de maior importância para o estabelecimento da *ETo* na região.

Houve pouca diferença entre a estimativa mensal e quinzenal quando se comparou a *ETo* de Penman-Monteith e demais metodologias empíricas.

A estimativa da *ETo* pela equação de Penman-Monteith não fica prejudicada quando se utiliza valores medidos ou estimados da radiação solar global (R_s), e também pelo uso da velocidade média do vento medida a 2 m (U_2) ou medida a 10 m (U_{10}) e transportada por equação para medição a 2 m de altura.

A metodologia de Makkink (1957) obteve um excelente desempenho comparado à estimativa da *ETo* por Penman-Monteith, seguidas da estimativa de Camargo (1971), Balanço de Energia e Thornthwaite (1948), que apresentaram desempenhos inferiores entretanto ainda assim recomendáveis. Os métodos de Linacre (1977), Blaney-Criddle FAO-24, Radiação FAO-24, Jensen-Haise (1963) e Turc (1961) obtiveram desempenhos insatisfatórios.

A metodologia proposta para o ajuste local das equações empíricas através de auto-regressão dos ruídos entre as metodologias empíricas e a estimativa tomada como referência (*EToPMRss*), teve excelentes resultados para as metodologias que já possuíam boa correlação, mas precisão ruim.

As equações de Makkink (1957), da Radiação Solar FAO-24, de Turc (1961), de Jensen-Haise (1963), do Balanço de Radiação, de Camargo (1971) obtiveram excelentes ajustes por *AR* dos ruídos para a estimativa quinzenal, da mesma forma para estimativa mensal as metodologias da Radiação Solar FAO-24, de Makkink (1957), Jensen-Haise (1963), de Camargo (1971), do Balanço de Radiação, de Turc (1961) e de Thornthwaite (1948).

O ajuste por regressão linear é mais recomendável, por ser mais simples e obter excelentes resultados quando a metodologia a ser ajustada possui boa correlação com a metodologia tomada como referência. As equações de Makkink (1957), da Radiação Solar FAO-24, de Turc (1961), do Balanço de Radiação, de Jensen-Haise (1963), de Camargo (1971) foram muito bem ajustadas por regressão linear em estimativa quinzenal, para período mensal, além das mencionadas para estimativa mensal, acrescenta-se ainda a equação de Thornthwaite (1948).

5.1. OBSERVAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são listadas algumas observações para melhor operação dos lisímetros em trabalhos futuros. Resultantes da dificuldade encontrada ao se analisar os dados fornecidos. Algumas sugestões são específicas para a operação dos lisímetros da Estação

Agroclimatológica da área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP de Jaboticabal, mas que também podem ser aplicadas a outros lisímetros tipo livre drenagem.

Os lisímetros tipo livre drenagem são de difícil monitoramento. As recomendações são muitas para que ele opere em condições ideais, desde o cuidado com a cultura que cobre sua superfície até a operação ideal para que ele opere em condições potenciais. Algumas considerações são necessárias para que se obtenham dados mais consistentes a partir do aparelho. A manutenção do solo em capacidade campo é a parte mais importante e mais difícil de ser controlada em um evapotransporímetro, de forma que para garantir esta condição não se devem deixar longos períodos sem irrigação. Esta também deve ser administrada de forma distribuída nos dias, para evitar a alta percolação nos dias posteriores ao ingresso da água no sistema, há recomendações para que a percolação não seja menor que $1L$ (CAMARGO, 1962). A utilização de tensiômetros para monitorar a armazenagem de água no solo, auxilia no cálculo da ET_o , e diminui o erro. O estabelecimento dos intervalas para irrigação também facilita o cálculo da ET_o . Para este tipo específico de lisímetro sugere-se intervalos de 10 dias.

Outra grande dificuldade ocorre em períodos chuvosos. Para evitar transbordamento do galão de coleta do percolado deve-se coletá-lo mais vezes ao dia. Pode-se, também, utilizar tanques com capacidade de reter maiores volumes, e ter o cuidado de se irrigar em menor frequência e com menores volumes de água.

A estimativa da ET é um parâmetro fundamental para o estabelecimento do Balanço Hídrico em uma região. Entretanto, nem todas as culturas de uma área de estudo são irrigadas. Assim, o conhecimento da evapotranspiração real (ETR) é de grande importância, para isso o evapotranspirômetro deve ser operado em condição de disponibilidade natural, sem a irrigação. Desta forma, sugeriu-se manter 6 (seis) lisímetros operando em evapotranspiração

potencial; 3 (três) lisímetros da bateria em déficit hídrico, sem irrigação; 3 (três) lisímetros próximo ao ponto de murcha, irrigando em intervalos determinados pelo ponto de murcha do solo, para posterior comparação dos dados.

No período chuvoso provavelmente a ET_o e ETR serão coincidentes, mas para os períodos de secos pode-se encontrar ETR nula. Neste caso é necessário o monitoramento da umidade do solo em todo o perfil, para a determinação do armazenamento de água no solo (ΔS), da equação de cálculo da ET em lisímetro (eq. 04). O uso de tensiômetros neste caso é imprescindível.

Este estudo também poderia ser aprimorado em aparelhos de maior precisão, tal como o lisímetro de pesagem que fornece dados em períodos menores (diária ou até horária).

Visando facilitar a estimativa da ET_o para pequenas propriedades, desenvolver-se-ia um estudo mais amplo em que se correlacionaria a metodologia de Thornthwaite ou de Camargo, por serem dependentes apenas da temperatura média, e as ajustaria para uma região mais ampla, envolvendo outras estações meteorológicas de forma a desenvolver um mapa da evapotranspiração no estado São Paulo.

Outra alternativa interessante seria ampliar a malha de estações climatológicas, consorciando estações automáticas e convencionais para o estado, com a medição dos parâmetros de maior importância da ET_o .

6. APÊNDICES

Para se determinar a *EToLis* valeu-se de uma planilha de cálculo como exemplificado no **Apêndice A**. Inicialmente estabeleceu-se a média dos volumes percolados nos 12 lisímetros, que na planilha está representado por *Perc (mL)* na coluna 2. A coluna 3 representa a precipitação mais a irrigação ministrada diariamente no período, que está representado por *P+Ir (mL)*. Para a determinação da *EToLis* diária considerou-se o início de um período o dia em que houvesse uma entrada de água no lisímetro, seja por irrigação ou por precipitação. O fim do período foi definido como o dia em que a drenagem chegasse a um volume crítico abaixo de 1000 *mL* e anterior a uma nova entrada de água no tanque que representasse um aumento na percolação nos dias posteriores. Para o caso demonstrado no **Apêndice A**, o período iniciou-se no dia 30/03/2001 e terminou no dia 17/04/2001.

A coluna 4 representa o volume total de *P+Ir* neste período [$\sum_{i=1}^N (P + L)$], a coluna 5 o volume total do percolado médio no período definido [$\sum_{i=1}^N (Perc)$], a coluna 6 é a subtração da coluna 4 pela coluna 5 e representa a *ETo* total medida em lisímetro para o intervalo definido (*ETo no período*) e a coluna 7 representa a média da *ETo* lisimétrica neste intervalo. A coluna 8 demonstra a *ETo* medida em lisímetro em *mm*, distribuída diariamente de acordo com o cálculo descrito anteriormente.

Apêndice A. Extrato da planilha de cálculo para determinação da *EToLis*.

1	2	3	4	5	6	7	8
Data	<i>Perc</i>	$(P+I)$	$\sum_{i=1}^N (P+L)$	$\sum_{i=1}^N (Perc)$	<i>ETo no período</i>	<i>ETo_d</i>	<i>ETo_d</i>
	<i>mL</i>	<i>mL</i>	<i>mL</i>	<i>mL</i>	<i>mL</i>	<i>mL</i>	<i>mm</i>
27/3/2001	507,5	0					3,1
28/3/2001	450,8	0					3,1
29/3/2001	362,5	0	73100	29730,8	43369,2	3097,8	3,1
30/3/2001	333,3	21800					2,4
31/3/2001	297,9	10500					2,4
1/4/2001	252,5	22200					2,4
2/4/2001	281,7	0					2,4
3/4/2001	864,2	0					2,4
4/4/2001	1702,5	0					2,4
5/4/2001	1778,3	0					2,4
6/4/2001	1497,5	0					2,4
7/4/2001	1345,8	3200					2,4
8/4/2001	1060,0	0					2,4
9/4/2001	916,7	1700					2,4
10/4/2001	790,0	0					2,4
11/4/2001	641,7	0					2,4
12/4/2001	564,2	0					2,4
13/4/2001	505,8	0					2,4
14/4/2001	442,5	0					2,4
15/4/2001	366,7	0					2,4
16/4/2001	310,0	0					2,4
17/4/2001	275,8	0	59400	14227,1	45172,9	2377,5	2,4
18/4/2001	241,7	20000					3,3
19/4/2001	233,8	40000					3,3
20/4/2001	687,5	0					3,3

Apêndice B. Dados climatológicos referentes aos meses de dezembro de 2000 a dezembro de 2006 em médias quinzenais.

Ano	Mês	Quinzenas	R_s $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$	T_{med} $^{\circ}C$	UR %	n h	$U10$ $m.s^{-1}$	$U2$ $m.s^{-1}$
2000	Dez	1	28,917	24,9	71,8	8,7	*	1,43
		2	20,080	23,6	82,0	5,6	*	1,36
	Jan	1	22,290	24,7	74,2	7,6	*	1,21
		2	21,710	25,0	77,1	7,9	*	1,29
	Fev	1	19,400	24,9	81,2	5,7	*	1,01
		2	24,022	25,1	74,8	9,4	*	0,98
	Mar	1	19,299	24,0	80,7	7,4	*	1,31
		2	21,251	24,9	72,2	8,6	*	0,79
	Abr	1	19,680	23,9	76,1	8,6	*	0,87
		2	18,764	23,7	65,6	9,5	*	0,93
	Mai	1	16,155	20,4	70,0	8,3	*	0,82
		2	11,748	18,8	81,1	6,0	*	1,05
	Jun	1	13,961	20,9	72,1	8,5	*	0,70
		2	12,168	16,8	73,9	6,3	*	1,16
	Jul	1	15,030	19,4	64,6	8,6	*	1,16
		2	14,253	20,5	65,1	7,6	*	1,35
	Ago	1	18,451	20,4	49,5	10,1	*	1,00
		2	16,089	21,5	64,7	7,5	*	1,27
	Set	1	18,075	23,5	59,5	8,3	*	1,46
		2	17,986	21,3	62,8	6,6	*	1,74
	Out	1	18,230	23,2	70,1	6,3	*	1,31
		2	22,076	23,8	59,9	9,2	*	0,85
	Nov	1	18,381	24,0	72,9	6,2	*	0,97
		2	21,318	24,9	73,7	8,2	*	1,26
	Dez	1	20,448	23,6	72,9	5,9	*	1,36
		2	19,649	23,6	81,0	6,8	*	1,41
2001	Jan	1	17,777	23,9	79,6	5,4	*	1,02
		2	19,693	24,1	78,9	6,6	*	1,34
	Fev	1	17,579	23,2	81,0	6,5	2,05	0,99
		2	15,667	23,6	84,4	4,8	2,16	1,18
	Mar	1	22,340	25,2	70,8	9,4	1,69	0,95
		2	18,977	24,6	79,4	8,1	2,31	1,32
	Abr	1	20,205	24,5	68,6	10,2	1,81	0,84
		2	16,961	24,5	62,6	9,9	1,91	0,89
	Mai	1	14,490	22,4	73,1	7,5	1,57	0,62
		2	13,701	19,4	73,2	7,2	2,15	1,11
	Jun	1	14,713	21,3	65,2	9,2	1,65	0,78
		2	13,889	20,1	62,1	8,9	1,88	0,85
	Jul	1	12,672	17,9	66,3	7,3	1,75	0,81
		2	13,814	20,0	59,5	8,0	2,32	1,07
	Ago	1	13,887	23,0	61,5	7,7	1,87	0,75

2003		2	15,757	22,4	52,3	8,6	2,45	1,26
	Set	1	17,104	21,3	59,6	7,6	2,79	0,99
		2	15,761	21,5	68,8	6,1	2,52	1,27
	Out	1	22,050	26,9	48,6	9,7	2,22	0,88
		2	20,598	26,5	55,2	8,1	2,93	1,52
	Nov	1	20,758	23,7	64,8	7,0	3,24	1,96
		2	19,642	25,5	73,4	6,3	2,67	1,42
	Dez	1	18,316	24,9	78,2	4,9	2,68	1,83
		2	24,251	25,1	76,0	9,0	2,42	1,36
	Jan	1	18,827	25,0	82,9	5,8	2,22	1,07
		2	15,828	23,6	87,2	3,8	2,78	1,04
	Fev	1	24,985	25,6	74,0	9,5	1,88	0,53
		2	20,116	25,2	77,0	7,7	2,23	0,72
	Mar	1	17,916	24,6	78,9	6,7	2,34	0,70
		2	18,981	23,5	76,2	7,7	2,28	1,04
	Abr	1	15,394	21,7	78,9	5,9	1,54	0,55
		2	20,922	23,4	70,6	9,5	1,27	0,42
	Mai	1	14,962	18,5	72,1	8,3	1,77	0,64
		2	16,066	19,5	69,3	9,1	1,06	0,87
	Jun	1	13,913	21,5	74,8	8,2	1,11	0,74
		2	14,606	19,4	64,3	9,5	0,66	0,43
	Jul	1	13,283	18,4	64,0	8,3	2,00	0,60
		2	15,081	20,4	58,0	9,0	1,32	0,29
	Ago	1	15,029	20,0	62,1	7,6	1,90	0,48
		2	18,229	19,2	56,0	9,4	1,84	0,43
	Set	1	17,081	21,4	58,1	8,0	2,43	0,64
		2	18,861	24,3	54,6	8,4	2,07	0,54
	Out	1	17,652	23,5	61,0	7,4	2,75	0,79
		2	17,386	24,5	60,2	7,0	2,28	0,54
	Nov	1	18,342	24,0	62,9	8,2	2,77	0,88
		2	17,266	24,0	74,5	6,2	2,84	1,13
	Dez	1	17,439	24,7	79,3	5,9	2,39	1,09
		2	22,985	25,2	69,2	9,2	2,82	1,61
2004	Jan	1	18,276	24,1	81,4	6,6	2,10	0,65
		2	17,440	23,9	77,5	5,9	2,58	0,73
	Fev	1	19,773	23,8	76,1	7,9	2,43	0,68
		2	17,476	23,7	82,2	6,3	1,51	0,27
	Mar	1	17,695	24,2	78,7	7,3	2,03	0,51
		2	20,806	22,6	71,6	9,2	1,84	0,38
	Abr	1	16,115	23,2	78,4	7,0	1,63	0,32
		2	15,768	22,4	76,7	7,7	1,74	0,40
	Mai	1	11,906	19,8	78,8	5,3	1,22	0,32
		2	13,094	17,8	81,4	6,4	1,77	0,47
	Jun	1	10,808	17,0	81,5	5,9	1,68	0,41
		2	14,601	19,3	72,1	8,7	1,28	0,24
	Jul	1	13,459	19,6	76,6	7,5	1,66	0,31
		2	15,386	16,0	71,2	8,4	2,47	0,66
	Ago	1	18,408	18,0	60,8	9,7	2,25	0,87

2005		2	18,691	22,8	53,2	9,8	1,40	0,25
	Set	1	20,310	24,6	43,9	10,0	2,29	1,09
		2	19,484	25,4	47,1	9,0	2,35	1,61
	Out	1	14,124	21,5	71,4	5,1	2,72	1,74
		2	16,655	23,1	70,2	6,3	2,97	1,86
	Nov	1	18,251	24,1	66,9	7,6	2,88	1,91
		2	18,306	23,8	68,9	7,7	2,44	1,68
	Dez	1	19,525	23,5	74,5	8,6	2,36	1,58
		2	17,641	24,3	77,0	6,7	2,35	1,59
	Jan	1	17,123	24,3	82,0	6,2	2,36	1,61
		2	13,837	23,9	86,1	3,7	2,51	1,68
	Fev	1	21,441	23,4	71,2	9,9	2,14	1,36
		2	20,677	25,2	71,1	9,0	1,95	1,30
	Mar	1	19,585	24,9	73,7	8,2	2,23	1,46
		2	15,960	23,7	82,0	6,5	1,98	1,30
	Abr	1	19,692	25,5	70,1	9,9	1,63	1,04
		2	16,141	22,3	76,4	6,7	1,71	1,06
	Mai	1	17,905	20,5	68,8	9,2	1,60	1,02
		2	12,508	20,6	78,0	6,5	1,78	1,05
	Jun	1	15,203	20,2	72,6	8,9	1,45	0,86
		2	12,622	19,4	76,2	7,2	1,48	0,99
	Jul	1	14,610	18,1	68,5	8,4	2,21	1,43
		2	13,027	18,4	73,6	7,5	1,85	1,19
	Ago	1	17,799	19,4	58,4	10,1	1,49	1,04
		2	17,278	23,1	54,3	9,4	2,39	1,68
	Set	1	16,190	22,5	67,9	7,5	3,05	2,00
		2	14,389	21,3	73,2	6,0	2,70	1,68
	Out	1	18,097	26,3	61,2	8,1	2,41	1,63
		2	15,155	24,2	71,6	6,3	2,47	1,67
	Nov	1	19,147	24,2	63,1	9,2	2,72	1,77
		2	15,686	24,5	72,0	5,5	2,92	2,04
	Dez	1	14,328	23,1	81,0	4,9	2,93	1,83
		2	19,217	23,9	74,7	8,2	2,75	2,00
2006	Jan	1	17,397	23,9	79,1	6,0	2,21	1,54
		2	20,012	26,0	70,5	9,1	1,83	1,30
	Fev	1	18,256	24,5	81,0	7,6	1,98	1,35
		2	15,151	24,0	84,8	5,3	1,78	1,19
	Mar	1	18,713	24,9	78,5	8,7	1,93	1,28
		2	15,356	24,1	84,2	5,7	1,89	1,24
	Abr	1	16,695	23,2	77,5	8,0	1,71	1,11
		2	16,839	21,5	72,2	9,0	1,88	1,19
	Mai	1	16,670	18,2	66,1	9,3	1,50	0,96
		2	13,041	19,1	73,9	6,9	1,62	1,08
	Jun	1	14,850	19,3	66,6	9,2	1,58	1,11
		2	14,260	18,4	66,3	8,7	2,01	1,36
	Jul	1	15,254	19,8	65,1	9,1	1,57	1,12
		2	16,234	20,3	55,6	8,4	1,79	1,26
	Ago	1	19,063	22,3	54,1	9,7	1,90	1,33

	2	20,984	21,7	51,1	10,0	2,45	1,61
Set	1	21,224	21,7	52,2	8,9	2,61	1,76
	2	16,977	22,4	68,5	6,4	2,75	1,80
Out	1	16,388	23,6	79,1	6,1	2,51	1,64
	2	21,771	23,8	65,3	9,1	2,79	1,77
Nov	1	21,811	22,7	69,8	8,0	2,97	1,95
	2	23,383	25,5	68,9	8,9	2,53	1,77
Dez	1	18,473	24,0	81,3	6,2	2,78	1,82
	2	18,921	24,6	83,0	5,9	2,16	1,42

*Falhas devido a problemas no anemômetro.

Apêndice C. Dados climatológicos referentes aos meses de dezembro de 2000 a dezembro de 2006 em médias mensais.

Ano	Mês	R_s $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$	T_{med} $^{\circ}C$	UR %	n h	$U10$ $m.s^{-1}$	$U2$ $m.s^{-1}$
2000	Dez	24,356	24,2	77,0	7,1	*	1,39
	Jan	21,990	24,8	75,7	7,7	*	1,25
	Fev	21,711	25,0	78,0	7,5	*	0,99
	Mar	20,306	24,5	76,3	8,0	*	1,04
	Abr	19,222	23,8	70,9	9,1	*	0,90
	Mai	13,880	19,6	75,7	7,1	*	0,94
	Jun	13,064	18,9	73,0	7,4	*	0,93
	Jul	14,629	20,0	64,9	8,1	*	1,26
	Ago	17,232	21,0	57,3	8,7	*	1,14
	Set	18,031	22,4	61,2	7,5	*	1,60
	Out	20,215	23,5	64,8	7,8	*	1,07
	Nov	19,850	24,5	73,3	7,2	*	1,12
2001	Dez	20,035	23,6	77,1	6,4	*	1,39
	Jan	18,766	24,0	79,3	6,0	*	1,19
	Fev	16,623	23,4	82,7	5,6	2,10	1,08
	Mar	20,604	24,8	75,2	8,7	2,01	1,14
	Abr	18,583	24,5	65,6	10,0	1,86	0,87
	Mai	14,083	20,8	73,2	7,3	1,87	0,88
	Jun	14,301	20,7	63,6	9,0	1,77	0,81
	Jul	13,262	19,0	62,8	7,6	2,04	0,95
	Ago	14,852	22,7	56,7	8,1	2,17	1,02
	Set	16,432	21,4	64,2	6,9	2,65	1,13
	Out	21,301	26,7	52,0	8,9	2,59	1,21
	Nov	20,200	24,6	69,1	6,7	2,95	1,69
2002	Dez	21,379	25,0	77,1	7,0	2,55	1,59
	Jan	17,279	24,2	85,1	4,8	2,51	1,05
	Fev	22,550	25,4	75,5	8,6	2,06	0,62
	Mar	18,466	24,0	77,5	7,2	2,31	0,87
	Abr	18,158	22,6	74,8	7,7	1,41	0,49
	Mai	15,532	19,0	70,7	8,7	1,40	0,76
	Jun	14,259	20,5	69,5	8,8	0,89	0,59
	Jul	14,211	19,4	60,9	8,7	1,65	0,44
	Ago	16,681	19,6	59,0	8,6	1,87	0,46
	Set	17,971	22,8	56,4	8,2	2,25	0,59
	Out	17,514	24,0	60,6	7,2	2,50	0,66
	Nov	18,026	21,8	73,7	8,2	1,44	0,51
2003	Dez	20,301	25,0	74,1	7,6	2,61	1,36
	Jan	17,844	24,0	79,4	6,2	2,35	0,69
	Fev	18,585	23,7	79,3	7,1	1,96	0,47
	Mar	19,301	23,4	75,0	8,3	1,93	0,44
	Abr	15,942	22,8	77,6	7,4	1,69	0,36

	Mai	14,083	20,8	73,2	7,3	1,87	0,88
	Jun	12,704	18,1	76,8	7,3	1,48	0,32
	Jul	14,453	17,8	73,8	8,0	2,08	0,49
	Ago	18,554	20,5	56,9	9,8	1,81	0,55
	Set	19,897	25,0	45,5	9,5	2,32	1,35
	Out	15,430	22,3	70,8	5,7	2,85	1,80
	Nov	18,278	23,9	67,9	7,6	2,66	1,79
	Dez	18,553	23,9	75,8	7,6	2,35	1,58
2005	Jan	15,427	24,1	84,1	4,9	2,44	1,65
	Fev	21,059	24,3	71,1	9,4	2,04	1,33
	Mar	17,714	24,3	78,0	7,3	2,10	1,38
	Abr	17,917	23,9	73,3	8,3	1,67	1,05
	Mai	15,120	20,6	73,5	7,8	1,69	1,03
	Jun	13,834	19,7	74,8	7,9	1,47	0,93
	Jul	13,793	18,2	71,1	7,9	2,03	1,31
	Ago	17,531	21,3	56,3	9,7	1,95	1,37
	Set	15,289	21,9	70,5	6,8	2,88	1,84
	Out	16,579	25,2	66,6	7,2	2,44	1,65
	Nov	17,417	24,3	67,6	7,3	2,82	1,90
	Dez	16,851	23,5	77,7	6,6	2,84	1,92
2006	Jan	18,747	25,0	74,7	7,6	2,01	1,42
	Fev	16,704	24,2	82,9	6,5	1,88	1,27
	Mar	16,981	24,5	81,4	7,1	1,91	1,26
	Abr	16,767	22,4	74,8	8,5	1,80	1,15
	Mai	14,797	18,7	70,1	8,0	1,56	1,02
	Jun	14,555	18,9	66,4	8,9	1,80	1,23
	Jul	15,760	20,0	60,2	8,8	1,68	1,19
	Ago	20,055	22,0	52,5	9,9	2,19	1,48
	Set	19,100	22,1	60,4	7,7	2,68	1,78
	Out	19,166	23,7	72,0	7,7	2,66	1,70
	Nov	22,597	24,1	69,3	8,4	2,75	1,86
	Dez	18,704	24,4	82,2	6,1	2,46	1,62

*Falhas devido a problemas no anemômetro.

Apêndice D. Medida da *EToLis* e estimativa da *EToPMRss*, da *EToPMRso* e da *EToPMRss_U10* referentes aos meses de dezembro de 2000 a dezembro de 2006 em períodos quinzenais.

Ano	Mês	Quinzenas	<i>EToLis</i> mm	<i>EToPMRss</i> mm	<i>EToPMRso</i> mm	<i>EToPMRss_U10</i> mm
2000	Dez	1	57,1	75,4	89,9	**
		2	78,0	63,3	65,3	**
	Jan	1	73,1	70,5	69,1	**
		2	68,9	74,9	70,4	**
	Fev	1	54,2	55,9	56,7	**
		2	54,2	67,5	66,2	**
	Mar	1	58,0	60,1	55,8	**
		2	48,1	67,1	67,0	**
	Abr	1	35,7	55,9	55,3	**
		2	48,0	53,2	50,3	**
	Mai	1	44,4	42,6	40,4	**
		2	46,5	31,5	27,2	**
	Jun	1	33,1	35,9	31,6	**
		2	28,9	30,1	28,6	**
	Jul	1	38,6	36,5	35,1	**
		2	45,9	43,8	41,3	**
	Ago	1	42,4	48,2	46,0	**
		2	52,9	50,2	46,5	**
	Set	1	51,8	59,8	54,9	**
		2	54,8	56,0	54,3	**
	Out	1	63,5	58,6	56,1	**
		2	64,5	74,1	66,6	**
	Nov	1	107,6	63,1	57,7	**
		2	55,9	72,2	65,1	**
	Dez	1	*75,7	63,0	64,5	**
		2	*98,8	68,2	62,3	**
2001	Jan	1	86,2	58,8	54,3	**
		2	112,6	67,5	63,4	**
	Fev	1	100,5	56,1	47,7	56,7
		2	26,1	48,9	44,0	49,3
	Mar	1	*79,9	69,9	65,5	71,0
		2	*59,1	64,1	58,6	64,8
	Abr	1	41,1	61,5	55,3	64,3
		2	51,7	56,1	45,5	60,2
	Mai	1	56,4	41,2	36,9	44,1
		2	38,0	37,7	35,3	39,8
	Jun	1	40,6	36,8	32,7	40,2
		2	44,8	35,8	30,7	40,2
	Jul	1	33,8	32,6	28,6	35,9
		2	52,2	40,6	35,2	46,7

2003	Ago	1	45,4	44,0	36,3	49,0
		2	*65,8	59,8	50,3	65,9
	Set	1	*62,1	50,1	44,9	58,6
		2	28,9	52,2	46,3	56,1
	Out	1	57,2	73,5	66,3	83,0
		2	86,1	84,6	78,0	90,9
	Nov	1	79,1	70,7	68,9	73,4
		2	48,8	66,5	63,8	68,6
	Dez	1	*70,1	61,0	61,0	61,8
		2	*89,5	80,1	77,8	81,8
	Jan	1	88,3	61,8	58,2	62,2
		2	68,7	54,7	52,4	54,7
	Fev	1	52,0	69,2	68,4	71,9
		2	49,8	59,6	54,2	61,1
	Mar	1	50,8	59,0	53,3	61,0
		2	15,2	62,0	58,4	63,5
	Abr	1	44,0	44,5	41,9	46,3
		2	45,8	48,0	52,7	51,2
	Mai	1	57,7	38,4	32,7	41,4
		2	54,6	40,7	38,7	40,1
	Jun	1	43,4	35,0	31,7	35,6
		2	32,6	33,5	28,6	33,8
	Jul	1	45,7	31,6	25,9	38,0
		2	42,3	36,3	30,7	43,2
	Ago	1	49,1	37,7	34,0	45,9
		2	58,2	46,6	41,7	54,9
	Set	1	54,6	50,3	43,1	59,5
		2	77,8	56,1	48,6	67,6
	Out	1	67,6	59,8	50,3	69,4
		2	79,0	61,8	49,7	73,7
	Nov	1	69,6	68,2	52,1	76,5
		2	66,5	62,2	52,5	65,4
	Dez	1	94,2	61,4	53,0	63,0
		2	120,6	85,8	77,3	87,8
2004	Jan	1	119,4	62,8	53,2	64,1
		2	*121,7	64,3	55,9	67,1
	Fev	1	*111,6	61,7	52,6	64,3
		2	*104,2	56,8	49,0	57,8
	Mar	1	*88,4	58,7	49,4	61,0
		2	69,3	62,0	57,4	66,3
	Abr	1	60,6	48,3	42,9	50,6
		2	33,0	44,0	39,3	47,1
	Mai	1	26,8	31,7	27,7	34,0
		2	28,2	31,2	29,6	33,2
	Jun	1	27,4	26,8	22,1	29,0
		2	29,6	29,0	26,8	33,0
	Jul	1	30,2	30,4	27,7	33,7
		2	32,2	35,1	33,1	39,8

2005	Ago	1	41,1	42,9	41,8	47,6
		2	79,1	49,0	42,8	58,4
	Set	1	85,5	64,5	58,4	72,9
		2	82,5	75,4	67,3	76,6
	Out	1	*73,3	53,8	44,9	55,2
		2	*74,6	67,0	57,3	68,3
	Nov	1	*65,7	73,2	61,4	74,6
		2	*79,0	71,0	57,5	71,7
	Dez	1	*92,6	71,8	57,0	72,4
		2	*82,9	70,5	58,1	70,9
	Jan	1	*76,2	62,2	51,9	62,5
		2	*75,7	55,1	46,8	55,1
	Fev	1	*67,3	69,5	56,7	70,2
		2	*76,9	68,3	58,4	68,8
	Mar	1	*81,4	66,1	58,9	66,8
		2	*84,3	55,9	48,7	56,4
	Abr	1	*54,8	63,0	56,4	63,9
		2	54,9	46,3	46,3	46,9
	Mai	1	49,6	43,1	43,1	44,0
		2	*67,3	37,3	33,8	38,1
	Jun	1	*56,3	35,8	34,3	36,5
		2	22,6	33,4	30,2	33,7
	Jul	1	32,8	37,4	35,6	38,3
		2	59,9	38,1	32,3	38,6
2006	Ago	1	22,8	45,9	41,7	46,5
		2	52,2	65,7	57,5	66,4
	Set	1	76,4	60,2	53,0	61,5
		2	51,9	52,1	42,7	53,2
	Out	1	47,9	72,0	60,5	73,0
		2	83,7	70,8	55,7	71,5
	Nov	1	65,6	77,7	60,5	79,0
		2	*72,8	65,2	54,6	65,7
	Dez	1	*74,1	56,3	44,0	56,7
		2	*79,5	77,6	63,5	77,7
	Jan	1	*81,4	61,2	52,6	61,5
		2	*102,7	85,0	67,6	85,2
	Fev	1	*102,0	62,5	50,6	62,5
		2	*102,0	50,4	41,6	50,6
	Mar	1	*98,7	67,1	54,6	67,4
		2	50,9	54,0	48,4	54,2
	Abr	1	53,9	52,7	45,0	53,2
		2	66,2	50,2	43,7	51,0
	Mai	1	65,0	42,2	38,3	43,0
		2	51,9	36,2	32,7	36,5
	Jun	1	48,6	38,1	34,6	38,4
		2	52,4	37,2	34,2	37,8
	Jul	1	48,6	38,0	35,5	38,4
		2	42,1	46,1	46,9	46,4

Ago	1	43,1	52,0	53,0	52,5
	2	72,1	64,8	66,1	66,6
Set	1	24,9	61,8	63,5	62,9
	2	77,9	58,9	55,3	60,1
Out	1	*61,2	57,0	49,8	57,5
	2	*63,3	78,8	71,7	80,4
Nov	1	40,6	71,0	67,8	71,8
	2	58,4	78,4	74,7	78,7
Dez	1	74,0	63,4	57,5	63,7
	2	*107,2	66,4	62,6	66,5

*Falhas preenchidas pela equação (14)

**Não foi possível a estimativa devido a problemas no anemômetro a 10 m.

Apêndice E. Estimativa da EToPMRso_U10, da EToCam, da EToMak e da EToRad referentes aos meses de dezembro de 2000 a dezembro de 2006 em períodos quinzenais.

Ano	Mês	Quinzenas	<i>EToPMRso_U10</i>	<i>EToCam</i>	<i>EToMak</i>	<i>EToRad</i>
			<i>Mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
2000	Dez	1	*	68,9	66,9	112,2
		2	*	61,4	55,8	89,4
2001	Jan	1	*	64,1	62,2	103,0
		2	*	68,2	67,2	110,4
	Fev	1	*	58,0	48,7	77,9
		2	*	56,6	62,7	102,7
	Mar	1	*	55,2	55,8	90,1
		2	*	56,9	62,0	101,8
	Abr	1	*	47,1	53,3	86,5
		2	*	42,9	52,6	88,5
	Mai	1	*	33,6	42,5	70,2
		2	*	30,5	33,7	53,3
	Jun	1	*	30,3	38,8	63,1
		2	*	23,9	29,5	48,1
	Jul	1	*	28,3	38,3	64,7
		2	*	33,8	40,5	69,1
	Ago	1	*	34,1	48,6	85,2
		2	*	42,0	47,3	80,3
	Set	1	*	47,1	52,5	91,6
		2	*	45,9	47,3	82,0
	Out	1	*	53,3	50,6	85,1
		2	*	61,5	70,0	119,6
	Nov	1	*	60,3	54,3	90,3
		2	*	63,9	64,5	107,2
	Dez	1	*	61,1	53,4	89,8
		2	*	65,5	61,4	99,5
2002	Jan	1	*	62,0	51,7	83,6
		2	*	66,1	60,1	98,2
	Fev	1	48,6	54,1	50,8	81,8
		2	44,6	53,0	42,9	67,8
	Mar	1	66,6	57,9	65,1	108,2
		2	59,5	56,2	59,6	96,6
	Abr	1	58,3	48,3	59,9	99,8
		2	50,0	44,2	54,6	92,6
	Mai	1	40,0	37,0	41,2	66,9
		2	37,6	31,5	37,8	62,0
	Jun	1	36,3	30,9	40,9	68,2
		2	35,4	28,7	38,8	65,4
	Jul	1	32,0	26,0	33,4	55,4
		2	41,7	32,9	41,4	70,7
	Ago	1	41,7	38,5	42,9	72,6

2003		2	56,8	43,8	52,2	91,8
		1	53,8	42,5	47,9	81,9
	Set	2	50,5	46,4	46,4	78,6
	Out	1	76,2	62,2	68,0	119,1
		2	84,6	68,6	67,2	118,6
	Nov	1	71,8	59,5	57,2	99,6
		2	65,9	65,4	56,4	94,2
	Dez	1	61,7	64,7	49,9	82,4
		2	79,5	69,8	73,1	120,6
	Jan	1	58,8	64,8	54,4	86,7
		2	52,6	64,3	46,8	72,8
	Fev	1	71,2	59,8	65,2	105,9
		2	56,1	56,9	56,1	90,8
	Mar	1	55,8	56,6	53,3	85,3
		2	60,1	53,6	57,1	93,6
	Abr	1	43,9	42,7	41,7	66,3
		2	55,8	42,3	52,2	85,0
	Mai	1	36,0	30,4	40,7	66,3
		2	38,1	31,7	44,1	72,7
	Jun	1	32,3	31,2	38,2	61,5
		2	28,9	27,7	40,0	66,1
	Jul	1	32,7	26,8	36,7	61,0
		2	37,9	33,5	44,8	75,1
	Ago	1	42,4	33,4	40,4	67,7
		2	50,4	37,4	52,4	88,7
	Set	1	53,0	42,8	49,9	84,9
		2	60,7	52,6	57,3	98,0
	Out	1	60,8	54,1	55,2	94,0
		2	62,6	63,3	60,1	101,3
	Nov	1	61,8	60,1	62,8	106,8
		2	56,5	61,4	54,5	89,7
	Dez	1	55,2	64,1	54,5	88,5
		2	79,9	70,2	74,5	127,0
2004	Jan	1	55,1	62,5	57,0	90,1
		2	59,5	65,2	56,8	91,9
	Fev	1	56,1	55,4	56,9	91,9
		2	50,5	57,0	53,0	82,9
	Mar	1	52,4	55,4	55,2	87,8
		2	62,1	51,4	62,1	101,2
	Abr	1	45,6	45,5	46,9	74,2
		2	42,7	40,1	44,9	71,4
	Mai	1	30,2	32,4	32,5	50,9
		2	31,8	28,8	34,3	53,2
	Jun	1	24,7	24,4	28,6	44,4
		2	31,0	27,5	37,6	60,2
	Jul	1	31,3	28,7	35,4	56,0
		2	37,9	26,4	39,5	64,4
	Ago	1	46,6	30,1	45,4	77,1

2005		2	52,6	44,9	57,4	97,5
	Set	1	67,0	49,6	60,4	107,2
		2	68,6	55,4	60,8	109,1
	Out	1	46,5	49,7	44,4	75,7
		2	58,9	59,7	55,8	95,9
	Nov	1	62,9	60,5	60,1	104,4
		2	58,3	61,1	61,3	105,2
	Dez	1	57,9	61,0	65,4	109,5
		2	58,7	67,4	61,9	102,5
	Jan	1	52,3	62,9	55,3	89,6
		2	47,0	65,1	46,8	74,4
	Fev	1	57,6	54,6	64,7	108,7
		2	59,1	56,8	61,5	103,4
	Mar	1	59,7	57,3	59,8	99,7
		2	49,3	54,1	51,5	82,7
	Abr	1	57,4	50,4	59,7	99,4
		2	46,9	40,1	42,2	68,4
	Mai	1	44,0	33,8	45,3	75,4
		2	34,7	33,5	36,7	59,3
	Jun	1	35,0	29,2	39,3	64,1
		2	30,6	27,6	35,6	57,5
	Jul	1	36,5	26,3	36,7	61,5
		2	33,0	30,2	38,9	64,4
	Ago	1	42,4	32,4	47,7	82,0
		2	58,4	45,2	55,9	99,2
	Set	1	54,4	45,1	49,2	84,7
		2	44,1	46,0	45,5	76,6
	Out	1	61,6	60,7	60,4	105,3
		2	56,5	62,6	57,1	96,8
	Nov	1	62,1	60,6	67,2	117,0
		2	55,2	62,8	52,0	88,7
	Dez	1	44,8	59,8	48,8	80,0
		2	63,7	66,5	68,1	115,1
2006	Jan	1	53,0	62,0	54,5	89,4
		2	67,9	71,0	74,4	125,4
	Fev	1	50,8	57,2	56,8	92,2
		2	41,8	54,0	45,4	71,6
	Mar	1	55,1	57,3	61,7	100,5
		2	48,7	55,0	48,6	76,9
	Abr	1	45,6	45,7	50,8	82,5
		2	44,6	38,8	48,9	80,9
	Mai	1	39,2	29,9	43,6	73,0
		2	33,1	31,1	37,0	60,7
	Jun	1	35,0	28,0	39,5	66,3
		2	34,9	26,3	37,0	62,4
	Jul	1	35,9	28,9	40,0	67,5
		2	47,1	33,3	42,8	74,5
	Ago	1	53,5	37,4	49,0	85,9

	2	67,8	42,4	56,7	100,6
Set	1	64,6	43,4	53,3	95,3
	2	56,6	48,5	47,5	81,1
Out	1	50,4	54,3	50,0	82,2
	2	73,4	61,5	69,0	119,4
Nov	1	68,8	56,9	60,3	103,3
	2	75,1	65,5	67,9	116,3
Dez	1	58,0	62,4	55,1	90,3
	2	62,8	68,5	58,3	93,6

*Não foi possível a estimativa devido a problemas no anemômetro a 10 m.

Apêndice F. Estimativa da *EToJH*, da *EToLin*, da *EToBC* e da *EToBC* referentes aos meses de dezembro de 2000 a dezembro de 2006 em períodos quinzenais.

Ano	Mês	Quinzenas	<i>EToJH</i> mm	<i>EToLin</i> mm	<i>EToBC</i> mm
2000	Dez	1	105,8	71,5	60,6
		2	85,9	58,7	45,3
2001	Jan	1	97,8	68,5	54,8
		2	106,5	67,0	58,1
	Fev	1	77,5	62,9	39,5
		2	99,8	69,2	54,1
	Mar	1	86,9	61,0	44,9
		2	98,6	70,9	58,7
	Abr	1	83,2	64,2	45,8
		2	81,9	73,4	55,5
	Mai	1	61,2	59,9	40,5
		2	47,1	46,9	29,7
	Jun	1	56,9	59,1	40,7
		2	38,9	47,6	28,6
	Jul	1	53,7	61,8	42,9
		2	58,3	65,1	44,7
	Ago	1	69,2	79,3	61,0
		2	69,3	68,3	49,0
	Set	1	80,5	79,7	58,4
		2	69,3	69,0	46,8
	Out	1	77,1	67,8	47,2
		2	107,6	81,2	66,4
	Nov	1	84,0	68,7	47,7
		2	101,8	69,7	54,9
	Dez	1	82,6	66,8	48,8
		2	94,3	59,5	49,4
2002	Jan	1	80,0	61,8	43,3
		2	93,8	66,8	51,3
	Fev	1	77,7	54,8	39,2
		2	66,6	52,8	36,9
	Mar	1	103,8	72,9	58,7
		2	94,1	67,8	52,4
	Abr	1	94,5	72,6	56,1

2003		2	86,5	78,6	60,2
		1	62,5	62,6	40,0
	Mai	2	53,4	57,8	37,5
		1	60,4	66,2	47,1
		2	55,6	65,7	46,0
	Jun	1	45,2	56,0	35,3
		2	58,7	73,2	47,4
		1	65,2	76,7	50,7
	Ago	2	78,2	90,0	62,6
		1	70,2	72,0	50,5
		2	67,3	65,4	41,5
	Set	1	112,2	106,1	80,1
		2	109,9	102,4	73,5
		1	88,2	74,9	56,5
	Nov	2	90,7	71,7	50,8
		1	79,5	65,7	45,6
		2	116,1	72,6	62,5
	Dez	1	86,5	62,0	44,5
		2	72,5	58,1	37,2
		1	104,7	66,6	54,5
	Fev	2	89,4	63,6	47,8
		1	84,2	64,3	44,1
		2	87,9	67,2	50,9
	Mar	1	62,2	56,0	33,6
		2	80,8	67,9	50,7
		1	56,0	52,8	35,8
	Mai	2	62,1	61,3	44,5
		1	56,9	58,6	39,5
		2	56,0	61,5	44,2
	Jun	1	50,1	60,0	39,5
		2	64,2	75,0	50,6
		1	57,3	66,3	44,1
	Ago	2	72,0	75,2	53,5
		1	72,7	73,9	52,1
		2	89,1	89,1	60,3
	Set	1	84,6	78,9	55,2
		2	94,3	89,4	58,8
		1	97,1	78,4	59,8
	Out	2	84,7	65,9	46,5
	Nov				

2004	Dez	1	85,9	64,3	46,3
		2	118,6	79,9	69,6
	Jan	1	88,8	60,6	45,4
		2	88,2	67,7	48,6
	Fev	1	87,8	59,8	45,9
		2	81,8	58,9	38,4
	Mar	1	86,4	63,2	44,9
		2	93,8	68,8	55,7
	Abr	1	72,2	60,7	38,6
		2	68,0	59,4	40,4
	Mai	1	46,4	51,1	27,7
		2	46,7	47,1	28,4
	Jun	1	38,2	42,5	24,0
		2	52,7	54,7	37,5
	Jul	1	50,0	52,3	33,2
		2	50,2	50,8	33,8
	Ago	1	60,7	60,7	47,1
		2	86,7	88,9	64,6
	Set	1	94,8	101,8	76,9
		2	97,1	101,5	73,0
	Out	1	65,4	63,4	41,0
		2	84,9	72,1	50,4
	Nov	1	93,3	73,6	57,5
		2	94,5	71,8	55,3
	Dez	1	100,1	65,0	56,0
		2	96,4	69,1	53,5
2005	Jan	1	86,5	60,5	45,5
		2	73,0	60,0	38,9
	Fev	1	98,9	62,9	54,9
		2	98,0	68,5	56,2
	Mar	1	95,1	69,6	53,4
		2	80,1	62,9	44,3
	Abr	1	96,4	74,7	56,7
		2	63,5	59,4	38,8
	Mai	1	65,4	60,8	43,9
		2	53,4	57,8	35,2
	Jun	1	56,4	56,7	40,1
		2	47,1	51,9	33,1
	Jul	1	49,6	54,5	38,1

2006		2	52,6	55,4	35,6
		1	66,2	67,1	53,2
	Ago	2	85,2	88,9	67,0
	Set	1	73,7	67,7	49,9
		2	66,2	60,1	39,5
	Out	1	98,3	87,2	65,1
		2	89,0	74,4	51,6
	Nov	1	104,3	77,2	65,4
		2	81,8	70,1	48,6
	Dez	1	74,4	58,1	41,2
		2	105,4	70,1	59,8
	Jan	1	84,2	62,3	46,2
		2	120,2	81,6	69,8
	Fev	1	88,9	58,2	44,6
		2	71,0	53,6	36,1
	Mar	1	98,1	65,3	51,3
		2	76,4	62,1	41,3
	Abr	1	77,9	61,2	42,7
		2	72,3	60,8	46,0
	Mai	1	59,1	56,9	41,0
		2	51,8	56,8	36,0
	Jun	1	55,4	59,3	43,0
		2	50,6	57,3	40,7
	Jul	1	56,6	62,1	44,7
		2	61,1	78,4	51,9
	Ago	1	73,2	81,6	62,0
		2	83,6	89,0	67,7
	Set	1	78,5	82,2	61,9
		2	71,5	67,3	45,1
	Out	1	77,1	61,1	42,7
		2	106,4	79,9	64,1
	Nov	1	90,9	66,5	54,3
		2	108,6	76,6	62,5
	Dez	1	85,8	60,6	46,0
		2	91,9	64,9	47,5

Apêndice G. Estimativa da *EToBal*, da *EToTrc* e medidas da *P+I* referentes aos meses de dezembro de 2000 a dezembro de 2006 em períodos quinzenais.

Ano	Mês	Quinzenas	<i>EToBal</i> mm	<i>EToTrc</i> mm	<i>P+I</i> mm
2000	Dez	1	90,3	53,4	91,3
		2	83,3	45,3	107,8
2001	Jan	1	85,9	49,9	101,1
		2	93,0	54,0	100,6
	Fev	1	71,4	39,7	83,1
		2	83,0	50,1	83,1
	Mar	1	76,0	45,1	89,0
		2	77,3	50,1	79,4
	Abr	1	64,6	43,2	46,9
		2	53,8	42,7	58,3
	Mai	1	41,8	34,6	76,9
		2	36,1	28,0	84,8
	Jun	1	33,5	32,0	60,6
		2	26,6	24,2	48,6
	Jul	1	28,8	31,4	56,5
		2	35,2	33,5	62,5
	Ago	1	35,4	40,1	56,8
		2	49,5	38,9	81,2
	Set	1	55,7	43,2	73,5
		2	57,5	38,5	70,5
	Out	1	66,6	41,1	104,6
		2	83,0	58,3	91,6
	Nov	1	74,1	44,1	151,7
		2	87,8	51,7	102,7
	Dez	1	74,7	43,2	121,8
		2	88,5	49,4	163,5
2002	Jan	1	75,2	42,1	176,0
		2	86,0	48,5	224,6
	Fev	1	72,1	41,1	216,6
		2	63,9	35,3	101,4
	Mar	1	82,3	52,2	129,4
		2	77,7	48,2	91,7
	Abr	1	67,5	48,2	68,2

2003		2	54,8	44,3	65,2
		1	43,3	34,1	77,6
	Mai	2	35,6	31,1	53,0
		1	31,6	33,7	54,9
		2	27,4	31,9	60,7
	Jun	1	27,3	27,4	51,4
		2	32,6	34,6	69,8
	Jul	1	40,0	36,2	72,1
		2	46,4	44,8	103,8
	Ago	1	53,1	38,8	97,3
		2	57,5	38,4	48,5
	Set	1	72,6	60,1	76,8
		2	79,6	57,3	110,4
	Out	1	74,3	46,4	105,8
		2	79,4	45,8	86,6
	Nov	1	74,0	40,8	111,6
		2	100,7	58,4	146,8
	Dez	1	80,4	44,3	187,0
		2	73,3	38,6	174,4
	Jan	1	87,2	52,1	95,5
		2	75,7	45,3	80,0
	Fev	1	72,9	43,3	82,0
		2	73,0	46,2	33,0
	Mar	1	53,4	34,3	79,3
		2	55,7	42,4	80,6
	Abr	1	39,8	32,8	88,8
		2	37,9	35,8	84,7
	Mai	1	35,0	31,7	69,7
		2	27,9	32,6	60,0
	Jun	1	26,6	30,1	66,9
		2	34,0	36,6	76,7
	Jul	1	36,5	33,3	76,3
		2	46,2	44,3	83,2
	Ago	1	53,0	40,9	79,2
		2	61,1	49,8	94,5
	Set	1	66,1	46,3	85,6
		2	73,5	51,6	100,6
	Out	1	78,4	51,7	93,2
		2	77,2	44,1	95,6
	Nov	1	79,1	44,3	147,1
		2			
	Dez	1			

2004		2	98,8	59,4	168,2
	Jan	1	82,9	46,0	161,3
		2	81,2	46,1	205,1
	Fev	1	77,7	45,6	186,8
		2	74,8	43,0	173,4
	Mar	1	74,6	44,7	144,7
		2	74,6	49,8	97,7
	Abr	1	59,0	38,4	84,7
		2	51,8	36,7	59,9
	Mai	1	38,0	27,2	52,8
		2	36,4	28,2	55,7
	Jun	1	28,7	23,7	52,0
		2	30,6	30,8	51,2
	Jul	1	32,8	29,3	49,9
		2	34,5	31,3	53,2
	Ago	1	38,9	36,0	58,0
		2	51,6	47,3	107,3
	Set	1	54,1	53,5	113,0
		2	62,3	53,7	115,0
	Out	1	58,5	37,5	117,5
		2	75,0	45,2	119,9
	Nov	1	78,5	48,3	103,7
		2	80,2	49,5	127,8
	Dez	1	88,6	52,1	152,4
		2	87,9	49,9	134,9
2005	Jan	1	81,0	44,8	122,8
		2	72,8	38,7	121,9
	Fev	1	83,7	51,3	106,7
		2	79,1	49,3	124,1
	Mar	1	77,9	48,2	132,2
		2	69,4	42,1	137,5
	Abr	1	69,1	48,2	84,0
		2	50,6	34,8	93,3
	Mai	1	42,6	36,6	86,0
		2	37,6	30,7	106,6
	Jun	1	33,0	32,2	86,6
		2	32,4	29,6	49,7
	Jul	1	29,4	29,8	62,0
		2	36,7	31,8	99,1
	Ago	1	39,0	38,1	57,0

2006		2	51,6	46,2	75,4
		1	57,9	39,9	92,2
	Set	2	58,9	37,1	73,7
		1	73,2	49,5	69,9
		2	77,8	46,4	98,9
		1	84,8	53,5	82,2
		2	73,2	42,3	116,5
		1	72,7	39,8	119,0
		2	93,9	54,5	128,7
		1	78,4	44,1	132,1
		2	98,4	59,5	170,6
		1	79,4	45,7	169,5
		2	67,0	37,1	169,5
		1	82,3	49,6	163,5
		2	68,2	40,0	97,3
		1	62,2	41,2	89,1
		2	52,5	39,6	84,9
		1	39,0	34,8	83,8
		2	35,6	30,6	73,1
		1	29,8	32,2	68,6
		2	27,1	30,1	78,2
		1	30,2	32,7	74,9
		2	30,6	36,2	67,4
		1	38,9	41,2	63,6
		2	48,6	48,7	89,3
		1	52,0	45,7	61,7
		2	60,3	38,7	105,6
		1	69,3	40,8	95,6
		2	85,8	55,7	99,3
		1	80,2	48,1	78,7
		2	89,1	54,3	96,3
		1	80,2	44,6	111,8
		2	86,2	47,3	178,8

Apêndice H. Medida da *EToLis* e estimativa da *EToPMRss*, da *EToPMRso*, da *EToPMRss_U10* e *EToPMRso_U10* referentes aos meses de dezembro de 2000 a dezembro de 2006 em períodos mensais.

Ano	Mês	<i>EToLis</i> mm	<i>EToPMRss</i> mm	<i>EToPMRso</i> mm	<i>EToPMRss_U10</i> mm	<i>EToPMRso_U10</i> mm
2000	Dez	135	138,7	155,3	**	**
	Jan	142	145,4	139,5	**	**
	Fev	108	123,4	122,9	**	**
	Mar	106	127,2	122,8	**	**
	Abr	84	109,1	105,5	**	**
	Mai	91	74,1	67,6	**	**
	Jun	62	66,0	60,2	**	**
	Jul	84	80,3	76,5	**	**
	Ago	95	98,4	92,5	**	**
	Set	107	115,7	109,2	**	**
	Out	128	132,7	122,7	**	**
	Nov	164	135,3	122,8	**	**
2001	Dez	*163,5	131,2	126,8	**	**
	Jan	199	126,3	117,6	**	**
	Fev	127	105,1	91,7	106,0	93,2
	Mar	*134,3	134,0	124,1	135,8	126,1
	Abr	93	117,6	100,8	124,5	108,3
	Mai	94	78,9	72,2	84,0	77,6
	Jun	85	72,6	63,4	80,4	71,7
	Jul	86	73,2	63,8	82,6	73,7
	Ago	*113,7	103,8	86,6	114,9	98,5
	Set	*100,0	102,3	91,1	114,7	104,3
	Out	143	158,0	144,3	173,9	160,8
	Nov	128	137,2	132,7	142,0	137,7
2002	Dez	*151,3	141,1	138,8	143,5	141,3
	Jan	157	116,5	110,6	116,9	111,4
	Fev	102	128,8	122,7	133,0	127,3
	Mar	66	121,0	111,7	124,5	115,9
	Abr	90	92,5	94,6	97,6	99,7
	Mai	112	79,1	71,4	81,5	74,1
	Jun	76	68,5	60,2	69,4	61,2
	Jul	88	68,0	56,6	81,2	70,6
	Ago	107	84,3	75,7	100,8	92,8
	Set	132	106,4	91,8	127,1	113,7
	Out	147	121,7	100,0	143,2	123,4
	Nov	96	90,2	91,1	95,6	96,7
2003	Dez	215	147,1	130,3	150,8	135,1
	Jan	*200,4	127,1	109,1	131,1	114,6
	Fev	*197,6	118,5	101,6	122,2	106,6
	Mar	*144,0	120,7	106,8	127,3	114,5

2005	Abr	94	92,3	82,2	97,7	88,3
	Mai	94	78,9	72,2	84,0	77,6
	Jun	57	55,8	48,9	62,0	55,7
	Jul	62	65,5	60,8	73,5	69,2
	Ago	120	91,9	84,6	106,0	99,2
	Set	168	139,9	125,7	149,5	135,6
	Out	*141,7	120,9	102,2	123,6	105,4
	Nov	*139,0	144,3	118,8	146,2	121,2
	Dez	*164,4	142,3	115,2	143,4	116,6
	Jan	*145,0	117,3	98,7	117,7	99,2
	Fev	*138,7	137,8	115,2	139,1	116,7
	Mar	*156,4	122,1	107,6	123,2	109,0
	Abr	*114,4	109,3	102,7	110,8	104,4
	Mai	*121,3	80,4	76,9	82,1	78,6
	Jun	*94,3	66,7	62,3	67,8	63,4
	Jul	93	75,5	67,9	76,9	69,4
	Ago	75	111,5	99,3	112,9	100,8
	Set	128	112,3	95,7	114,7	98,5
	Out	132	142,8	116,2	144,4	118,1
	Nov	*124,1	142,9	115,1	144,6	117,3
	Dez	*146,4	133,9	107,5	134,4	108,5
2006	Jan	*171,4	146,2	120,2	146,8	120,9
	Fev	*187,9	112,9	92,2	113,1	92,6
	Mar	*152,4	121,0	103,0	121,6	103,9
	Abr	120	102,9	88,8	104,2	90,2
	Mai	117	78,4	71,0	79,6	72,3
	Jun	101	75,2	68,8	76,3	69,9
	Jul	91	84,1	82,4	84,8	83,1
	Ago	115	116,8	119,1	119,1	121,4
	Set	103	120,6	118,8	123,0	121,2
	Out	*122,4	135,8	121,5	137,8	123,8
	Nov	99	149,3	142,5	150,6	143,9
	Dez	*165,9	129,7	120,1	130,2	120,7

*Falhas preenchidas pela equação (15)

**Não foi possível a estimativa devido a problemas no anemômetro a 10 m.

Apêndice I. Estimativa da *EToTho*, da *EToCam*, da *EToMak*, da *EToRad* e da *EToJH* referentes aos meses de dezembro de 2000 a dezembro de 2006 em períodos mensais.

Ano	Mês	<i>EToTho</i> <i>mm</i>	<i>EToCam</i> <i>mm</i>	<i>EToMak</i> <i>mm</i>	<i>EToRad</i> <i>mm</i>	<i>EToJH</i> <i>mm</i>
2000	Dez	120,3	130,3	122,7	201,7	191,1
	Jan	127,4	132,3	129,3	213,4	204,3
	Fev	113,5	114,7	111,5	180,7	177,2
	Mar	112,8	112,2	117,8	191,9	185,5
	Abr	95,8	89,9	106,0	175,1	165,1
	Mai	54,0	64,0	76,2	123,5	107,8
	Jun	46,0	54,2	68,3	111,2	94,9
	Jul	56,7	62,1	78,8	133,7	112,0
	Ago	67,4	75,9	95,9	165,5	138,7
	Set	83,0	93,2	99,8	173,6	149,6
	Out	103,5	114,8	120,5	204,7	184,4
	Nov	117,1	124,1	118,8	197,6	185,5
2001	Dez	111,1	126,6	114,8	189,4	176,9
	Jan	114,1	127,8	111,8	181,8	173,8
	Fev	92,3	107,1	93,8	149,7	144,3
	Mar	116,8	114,0	124,6	204,8	197,8
	Abr	102,5	92,5	114,6	192,3	181,0
	Mai	62,5	68,3	78,9	128,9	115,6
	Jun	58,0	59,6	79,8	133,6	115,9
	Jul	46,6	58,8	74,8	126,1	103,6
	Ago	82,8	82,4	95,1	164,5	143,6
	Set	70,6	88,9	94,3	160,6	137,5
	Out	148,8	130,8	135,2	237,8	222,0
	Nov	117,7	124,8	113,6	193,8	179,0
2002	Dez	130,1	134,4	123,0	203,0	195,4
	Jan	119,7	129,1	101,2	159,5	158,7
	Fev	119,3	116,7	121,3	196,7	194,0
	Mar	107,7	110,1	110,4	178,9	172,2
	Abr	83,3	85,2	93,9	151,3	142,5
	Mai	50,9	62,2	84,8	139,0	118,1
	Jun	58,9	58,8	78,2	127,6	113,1
	Jul	53,3	60,3	81,6	136,1	114,1
	Ago	56,6	70,8	92,8	156,4	129,5

2004	Set	88,6	95,1	107,2	182,9	161,4
	Out	110,8	117,4	115,4	195,3	178,8
	Nov	85,1	78,8	92,9	150,2	138,4
	Dez	131,4	134,3	129,0	215,4	204,2
	Jan	116,8	127,7	113,9	182,0	176,9
	Fev	102,5	112,4	109,9	174,8	163,8
	Mar	100,6	106,7	117,3	188,9	180,4
	Abr	86,1	85,6	91,8	145,6	140,2
	Mai	66,3	68,3	78,9	128,9	115,6
	Jun	42,7	52,0	66,2	104,5	90,4
	Jul	42,2	55,2	74,9	120,3	100,6
	Ago	64,8	74,6	102,8	174,6	146,8
2005	Set	114,7	105,0	121,1	216,3	192,0
	Out	91,1	109,3	100,2	171,6	150,0
	Nov	111,3	121,6	121,4	209,7	187,8
	Dez	116,6	128,4	127,3	212,0	196,6
	Jan	116,5	128,1	102,1	164,0	159,3
	Fev	104,6	111,4	126,2	212,1	197,1
	Mar	110,4	111,3	111,3	182,4	174,8
	Abr	96,9	90,3	101,9	167,8	158,5
	Mai	62,2	67,3	81,9	134,8	118,8
	Jun	52,3	56,7	72,2	117,1	102,6
	Jul	43,7	56,5	75,6	126,0	102,1
	Ago	71,0	77,3	103,7	181,2	151,3
2006	Set	78,2	91,2	94,6	161,2	139,8
	Out	126,7	123,4	117,5	202,2	187,0
	Nov	115,1	123,4	119,1	205,7	186,1
	Dez	110,2	126,2	117,0	195,1	179,4
	Jan	129,9	133,1	128,8	214,9	203,6
	Fev	104,3	111,2	102,1	163,7	159,7
	Mar	113,2	112,2	110,3	177,5	174,2
	Abr	80,7	84,4	99,7	163,4	150,3
	Mai	47,8	61,0	80,7	133,8	111,2
	Jun	46,6	54,2	76,5	128,6	106,0
	Jul	57,6	62,2	82,8	142,0	117,8
	Ago	78,0	79,8	105,7	186,5	156,9
	Set	80,1	91,8	100,9	176,4	150,2
	Out	106,5	115,8	119,0	201,6	183,4
	Nov	112,6	122,3	128,2	219,7	199,2
	Dez	122,1	130,9	113,3	184,0	177,7

Apêndice J. Estimativa da *EToLin*, da *EToBC*, da *EToBal*, da *EToTrc* e a medida da *P+I* referentes aos meses de dezembro de 2000 a dezembro de 2006 em períodos mensais.

Ano	Mês	<i>EToLin</i> <i>mm</i>	<i>EToBC</i> <i>mm</i>	<i>EToBal</i>	<i>EToTrc</i> <i>mm</i>	<i>P+I</i> <i>mm</i>
2000	Dez	133,9	104,9	173,5	98,8	199,1
	Jan	140,0	113,0	178,9	103,9	201,7
	Fev	136,4	93,1	154,4	89,9	166,2
	Mar	136,5	103,4	153,3	95,2	168,4
	Abr	142,2	101,1	118,4	85,9	105,1
	Mai	109,8	69,5	77,9	62,6	161,7
	Jun	109,8	68,7	60,1	56,2	109,2
	Jul	131,2	87,7	63,9	64,8	119,1
	Ago	152,2	109,6	84,8	79,1	138,1
	Set	153,5	104,8	113,2	81,7	144,0
	Out	154,4	113,0	149,7	99,4	196,2
	Nov	142,9	102,6	161,9	95,7	254,4
2001	Dez	130,2	98,3	163,2	92,6	285,4
	Jan	128,6	94,6	161,2	90,6	400,6
	Fev	107,6	76,2	136,0	76,3	318,0
	Mar	140,6	110,9	160,0	100,4	221,1
	Abr	151,2	116,3	122,3	92,5	133,3
	Mai	120,2	77,5	78,9	65,2	130,6
	Jun	131,8	93,1	59,0	65,6	115,6
	Jul	128,9	82,4	60,0	62,0	121,3
	Ago	166,7	113,2	86,5	80,9	175,9
	Set	137,4	91,8	110,6	77,2	145,8
	Out	208,4	153,5	152,2	117,4	187,2
	Nov	146,7	107,3	153,8	92,2	192,4
2002	Dez	138,3	107,9	174,7	99,2	258,4
	Jan	120,0	81,3	153,8	82,9	361,4
	Fev	130,2	102,3	162,9	97,3	175,5
	Mar	131,5	95,0	145,9	89,6	115,1
	Abr	123,7	83,3	109,2	76,6	159,9
	Mai	114,1	80,1	77,7	68,5	173,5
	Jun	120,1	83,8	62,9	64,3	129,7
	Jul	134,8	90,0	60,7	66,6	143,6
	Ago	141,6	97,5	82,7	77,5	159,5
	Set	162,7	112,4	114,1	90,7	173,7
	Out	168,3	114,0	139,6	97,9	186,2
	Nov	120,9	102,0	102,9	75,5	164,4
2003	Dez	144,2	114,9	178,0	103,7	315,3
	Jan	128,3	94,0	164,1	92,2	366,3
	Fev	118,7	83,8	152,5	88,6	360,2
	Mar	132,0	100,5	149,2	94,5	242,4
	Abr	120,1	79,0	110,8	75,2	144,6

2005	Mai	120,2	77,5	78,9	65,2	130,6
	Jun	96,9	60,6	59,3	54,5	103,2
	Jul	103,0	67,2	67,3	60,6	103,1
	Ago	148,7	111,7	90,4	83,3	165,3
	Set	203,3	149,9	116,4	107,1	228,0
	Out	135,4	91,3	133,5	82,7	237,4
	Nov	145,4	112,8	158,7	97,8	231,5
	Dez	134,2	109,4	176,5	102,0	287,3
	Jan	120,5	84,2	153,8	83,4	244,7
	Fev	131,2	111,2	162,7	100,6	230,7
	Mar	132,4	97,3	147,3	90,3	269,7
	Abr	133,7	94,5	119,7	83,0	177,3
	Mai	118,6	78,7	80,2	67,3	192,7
	Jun	107,8	72,2	63,5	59,7	133,2
	Jul	109,9	73,6	66,1	61,7	161,2
	Ago	155,5	120,2	90,6	84,4	132,4
	Set	127,7	89,1	116,8	77,0	166,0
	Out	161,3	115,9	151,0	95,9	168,8
	Nov	147,4	113,4	158,0	95,9	198,7
	Dez	128,1	100,3	166,6	94,3	247,7
2006	Jan	143,6	115,0	176,8	103,6	302,7
	Fev	111,8	80,5	146,5	82,8	339,0
	Mar	127,3	92,1	150,5	89,6	260,8
	Abr	121,9	88,7	114,7	80,8	174,1
	Mai	113,8	76,9	74,5	65,5	157,0
	Jun	116,6	83,6	56,9	62,3	146,8
	Jul	140,4	96,7	60,8	68,9	142,3
	Ago	170,6	129,7	87,5	89,9	152,9
	Set	149,5	106,4	112,3	84,4	167,3
	Out	140,9	106,0	155,1	96,5	194,9
	Nov	142,9	116,7	169,3	102,4	175,0
	Dez	125,5	93,5	166,4	91,9	290,6

Apêndice K. Estimativa da $EToCam_{ar}$, da $EToMak_{ar}$, da $EToRad_{ar}$ e da $EToJH_{ar}$ referentes aos meses de janeiro de 2001 a dezembro de 2006 em períodos quinzenais.

Ano	Mês	Quinzenas	$EToCam_{ar}$ mm	$EToMak_{ar}$ mm	$EToRad_{ar}$ mm	$EToJH_{ar}$ mm
2001	Jan	1	73,6	72,3	72,6	75,8
		2	71,6	69,4	80,1	82,9
	Fev	1	61,4	50,5	47,7	53,6
		2	63,0	70,9	72,3	77,6
	Mar	1	59,6	56,1	59,9	63,0
		2	64,5	67,6	71,4	75,8
	Abr	1	52,3	54,9	56,3	59,5
		2	49,7	55,4	58,2	58,8
	Mai	1	40,1	43,6	39,9	37,9
		2	36,9	34,9	23,0	24,3
	Jun	1	36,8	42,4	32,7	34,8
		2	29,7	30,3	17,8	16,2
	Jul	1	36,1	42,4	34,3	31,9
		2	40,2	41,4	38,7	35,7
	Ago	1	40,3	50,6	54,8	46,7
		2	50,0	48,2	50,1	46,4
	Set	1	56,8	58,8	61,3	58,3
		2	53,9	51,6	51,7	46,6
	Out	1	62,2	57,4	54,7	55,0
		2	69,3	77,2	89,3	85,3
	Nov	1	68,5	57,8	60,1	60,5
		2	72,4	73,7	76,9	79,6
	Dez	1	67,2	57,5	59,5	59,3
		2	70,4	67,4	69,2	71,7
2002	Jan	1	70,0	59,7	53,3	57,5
		2	70,3	66,2	67,8	71,3
	Fev	1	58,2	55,3	51,5	54,6
		2	60,8	50,3	37,4	44,3
	Mar	1	63,6	72,8	77,8	81,8
		2	62,7	61,7	66,4	70,4
	Abr	1	53,9	62,4	69,5	71,1
		2	50,6	54,9	62,3	62,7
	Mai	1	43,0	41,5	36,6	38,9
		2	36,6	39,5	31,7	30,7
	Jun	1	37,0	42,9	37,9	38,0
		2	34,4	38,9	35,1	32,7
	Jul	1	32,2	34,0	25,1	22,5
		2	40,0	44,1	40,4	36,6
	Ago	1	45,1	44,5	42,3	42,7

2003	Set	2	50,3	55,3	61,5	55,6
		1	51,5	52,2	51,6	47,5
	Out	2	56,0	52,4	48,3	45,1
		1	70,9	75,2	88,8	90,2
	Nov	2	73,3	67,9	88,4	85,7
		1	65,2	61,7	69,4	64,6
	Dez	2	74,2	64,6	63,8	68,3
		1	70,2	57,0	52,0	56,7
	Jan	2	73,5	80,5	90,2	93,6
		1	71,4	58,0	56,4	62,8
	Fev	2	67,4	51,9	42,5	49,6
		1	64,5	74,7	75,5	82,8
	Mar	2	62,6	58,0	60,6	65,6
		1	60,9	56,0	55,0	60,9
	Abr	2	60,6	63,7	63,2	65,3
		1	49,2	45,1	36,0	39,1
	Mai	2	50,6	59,3	54,6	58,8
		1	37,1	42,0	36,0	32,8
	Jun	2	39,1	46,0	42,4	39,7
		1	37,3	37,8	31,2	34,0
	Jul	2	33,2	41,0	35,8	33,3
		1	33,3	36,8	30,7	27,4
	Ago	2	40,4	46,3	44,8	41,9
		1	39,8	40,8	37,4	34,4
	Set	2	45,6	56,4	58,3	49,8
		1	54,1	54,2	54,6	50,4
	Out	2	62,0	62,6	67,7	66,7
		1	60,7	58,3	63,7	61,4
	Nov	2	70,9	65,6	71,0	71,6
		1	67,8	70,0	76,5	74,4
	Dez	2	70,0	60,5	59,4	61,9
		1	71,0	62,3	58,1	63,5
2004	Jan	2	74,1	80,1	96,6	95,8
		1	69,0	60,1	59,9	64,9
	Fev	2	69,2	61,0	61,5	65,1
		1	59,8	62,5	61,5	65,0
	Mar	2	64,3	58,1	52,6	59,0
		1	59,7	59,1	57,4	63,5
	Abr	2	58,9	68,0	70,8	71,1
		1	52,7	48,4	43,9	48,8
	Mai	2	47,4	50,0	41,0	45,5
		1	39,8	36,5	20,6	23,8
	Jun	2	35,6	39,4	22,7	24,8
		1	31,6	32,0	14,0	16,1
	Jul	2	35,4	42,3	29,7	31,1
		1	35,2	36,5	25,6	27,4
		2	32,7	41,4	34,0	27,8

2005	Ago	1	39,0	47,8	46,8	38,6
		2	54,2	59,5	67,2	64,3
	Set	1	58,3	62,7	76,9	71,7
		2	62,5	62,1	78,9	73,5
	Out	1	55,3	46,1	45,5	41,7
		2	68,8	65,4	65,5	63,4
	Nov	1	69,3	68,9	74,1	71,1
		2	69,5	68,3	74,9	71,8
	Dez	1	68,0	70,6	79,2	77,1
		2	72,4	63,4	72,3	72,8
	Jan	1	70,3	63,1	59,2	63,8
		2	69,0	51,6	44,1	50,1
	Fev	1	59,0	74,2	78,3	77,0
		2	64,4	63,7	73,2	74,5
	Mar	1	61,7	60,5	69,5	71,3
		2	60,9	55,6	52,4	56,9
	Abr	1	56,7	65,2	69,0	73,8
		2	45,7	42,5	38,2	39,6
	Mai	1	41,3	50,3	45,1	43,1
		2	39,8	36,9	29,0	30,4
	Jun	1	34,7	41,7	33,7	33,9
		2	33,8	36,3	27,2	24,4
	Jul	1	32,8	38,5	31,2	27,3
		2	37,3	40,4	34,1	30,2
	Ago	1	39,9	50,3	51,6	44,0
		2	53,8	57,2	68,9	62,5
2006	Set	1	53,7	52,1	54,4	50,6
		2	54,7	51,0	46,2	43,8
	Out	1	69,5	67,9	74,9	76,4
		2	67,9	60,7	66,6	65,5
	Nov	1	68,4	75,5	86,7	81,9
		2	71,2	56,3	58,4	58,5
	Dez	1	66,2	57,6	49,6	52,2
		2	71,9	75,9	84,7	83,3
	Jan	1	69,7	59,9	59,2	61,1
		2	75,2	79,5	95,1	97,4
	Fev	1	59,6	55,8	62,0	64,3
		2	60,7	50,5	41,2	48,1
	Mar	1	62,6	68,5	70,1	75,8
		2	61,8	52,0	46,6	53,0
	Abr	1	51,7	57,4	52,1	55,5
		2	46,1	52,6	50,6	49,5
	Mai	1	37,8	46,1	42,7	36,3
		2	38,7	37,9	30,4	29,2
	Jun	1	34,3	41,8	35,9	33,1
		2	32,9	37,5	32,1	28,0
	Jul	1	35,9	41,3	37,2	34,2

	2	39,5	43,0	44,2	38,4
Ago	1	43,8	50,1	55,6	50,5
	2	49,3	57,5	70,4	60,5
Set	1	52,9	56,0	65,0	55,6
	2	57,8	51,5	50,9	48,8
Out	1	62,3	56,8	51,8	54,9
	2	69,0	76,4	89,0	84,1
Nov	1	65,1	64,1	73,1	67,6
	2	75,2	74,8	86,0	86,1
Dez	1	67,9	57,8	60,1	62,0
	2	73,0	63,6	63,3	69,1

Apêndice L. Estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToBC_{ar}$, da $EToBal_{ar}$ e da $EToTrc_{ar}$ referentes aos meses de janeiro de 2001 a dezembro de 2006 em períodos quinzenais.

Ano	Mês	Quinzenas	$EToLin_{ar}$ mm	$EToBC_{ar}$ mm	$EToBal_{ar}$ mm	$EToTrc_{ar}$ mm
2001	Jan	1	77,1	76,2	79,0	74,3
		2	58,5	65,1	72,9	66,2
	Fev	1	58,2	46,9	48,9	51,9
		2	66,3	71,6	75,8	70,3
	Mar	1	48,9	49,6	54,6	54,3
		2	69,6	73,3	66,9	67,0
	Abr	1	52,8	49,3	49,7	54,2
		2	62,8	63,4	44,3	54,5
	Mai	1	39,3	39,6	36,6	43,5
		2	29,1	32,1	32,8	36,0
	Jun	1	48,4	47,8	32,5	42,4
		2	26,9	27,9	25,9	30,7
	Jul	1	48,7	49,1	32,8	42,4
		2	42,2	42,4	37,8	40,1
	Ago	1	57,8	60,7	37,1	48,8
		2	40,5	42,2	55,0	46,7
	Set	1	68,5	66,3	60,2	59,7
		2	49,9	49,2	57,4	52,5
	Out	1	57,3	57,4	66,3	59,0
		2	74,5	79,0	79,0	77,3
	Nov	1	59,2	54,4	64,7	58,1
		2	68,6	72,6	84,9	74,4
	Dez	1	62,5	60,1	58,7	58,9
		2	53,2	60,8	78,0	66,7
2002	Jan	1	69,9	62,3	64,3	62,9
		2	62,9	65,1	74,0	64,7
	Fev	1	50,2	50,6	54,9	55,6
		2	55,6	54,6	56,2	53,6
	Mar	1	72,2	73,6	75,4	69,7
		2	58,2	58,7	62,5	59,8
	Abr	1	63,4	63,4	52,3	59,4
		2	62,1	62,0	43,1	51,9
	Mai	1	38,5	36,3	37,4	41,0
		2	38,1	40,1	31,1	38,4
	Jun	1	47,9	49,6	31,0	41,1
		2	40,1	41,5	28,2	36,4
	Jul	1	30,2	31,0	30,8	32,5
		2	54,4	49,6	36,3	42,8
	Ago	1	49,5	48,9	43,7	43,1
		2	64,1	61,9	48,4	54,0
	Set	1	45,6	50,3	59,9	50,7

2003		2	51,7	48,7	59,4	54,0
		1	98,1	93,6	72,3	77,1
	Out	2	69,0	66,5	71,0	63,2
		1	50,7	59,0	67,6	60,1
		2	66,2	63,2	76,4	66,0
	Nov	1	60,1	59,3	64,4	59,2
		2	67,0	75,9	90,7	76,2
	Dez	1	60,9	55,6	60,3	59,4
		2	54,2	50,3	57,4	53,4
	Jan	1	68,1	74,4	79,7	72,9
		2	58,1	56,4	56,4	56,6
	Fev	1	56,0	52,5	57,1	54,6
		2	63,7	65,9	64,9	63,4
	Mar	1	47,2	41,8	41,8	46,7
		2	62,9	66,0	54,7	58,8
	Abr	1	36,1	37,7	33,2	40,9
		2	48,4	49,6	36,2	43,9
	Mai	1	37,8	37,8	32,6	36,2
		2	41,2	44,2	26,1	38,3
	Jun	1	37,1	36,3	29,7	34,8
		2	53,4	50,3	38,3	43,1
	Jul	1	37,9	40,3	39,1	38,9
		2	56,5	56,7	50,9	55,4
	Ago	1	57,8	57,4	59,9	53,1
		2	74,1	66,5	63,1	64,1
	Set	1	54,3	57,4	63,0	56,0
		2	75,0	66,6	70,0	66,3
	Out	1	63,2	71,1	76,3	68,9
		2	58,0	57,0	71,0	61,0
	Nov	1	62,7	62,5	71,2	63,7
		2	75,3	82,5	84,9	75,1
	Dez	1	54,4	52,3	64,1	60,5
		2	65,2	61,2	63,4	59,8
2004	Jan	1	56,6	58,9	64,1	61,7
		2	58,7	52,1	62,8	58,5
	Fev	1	59,4	58,9	59,4	57,4
		2	65,8	70,2	65,3	66,0
	Mar	1	49,1	43,9	46,2	48,6
		2	51,7	52,7	46,5	50,5
	Abr	1	38,8	35,8	34,4	38,9
		2	35,2	38,4	36,0	39,8
	Mai	1	30,4	31,9	27,4	33,0
		2	45,0	46,9	33,6	41,6
	Jun	1	33,8	33,9	33,8	35,2
		2	35,4	37,3	34,0	38,2
	Jul	1	49,5	53,4	41,1	45,0
		2	75,8	66,1	54,5	56,6
	Ago	1	78,0	75,5	57,0	63,7
		2				

2005	Out	2	70,4	64,3	63,4	60,1
		1	32,5	35,6	54,5	44,8
	Nov	2	66,8	66,8	77,2	65,4
		1	70,2	73,8	75,3	69,5
	Dez	2	68,6	67,0	73,9	68,6
		1	61,3	67,0	78,4	68,2
	Jan	2	64,8	60,6	66,8	60,7
		1	58,6	62,1	70,5	65,2
	Fev	2	57,3	51,5	56,5	53,1
		1	66,3	73,7	76,5	72,1
	Mar	2	67,1	64,6	62,5	61,1
		1	59,8	56,8	59,5	56,9
	Abr	2	57,3	53,7	57,5	56,2
		1	65,6	68,9	60,2	63,2
	Mai	2	44,2	40,1	37,6	42,4
		1	49,5	53,0	40,0	49,5
	Jun	2	41,7	35,5	33,6	36,4
		1	38,5	44,0	30,9	40,0
	Jul	2	34,6	32,7	32,2	35,1
		1	39,4	41,5	29,0	36,4
	Ago	2	40,2	36,2	38,8	38,5
		1	54,4	58,4	39,5	46,8
	Set	2	72,7	64,9	54,4	54,3
		1	47,7	47,1	60,8	50,8
2006	Out	2	51,9	47,0	57,1	52,1
		1	80,5	79,7	71,8	67,3
	Nov	2	55,1	53,5	68,7	59,0
		1	74,0	81,0	79,4	74,1
	Dez	2	64,6	55,7	62,2	58,1
		1	55,7	56,2	67,9	60,4
	Jan	2	67,8	75,7	84,9	72,9
		1	60,1	59,0	63,4	61,7
	Fev	2	77,4	81,9	84,0	74,3
		1	57,1	44,9	52,8	53,3
	Mar	2	53,0	50,7	53,7	52,5
		1	59,5	66,7	73,1	66,0
	Abr	2	59,8	52,0	52,9	53,2
		1	52,0	56,6	54,2	57,6
	Mai	2	51,3	55,8	44,9	51,6
		1	46,1	45,8	34,8	44,7
	Jun	2	43,0	38,0	34,4	37,5
		1	41,4	46,4	29,2	40,0
	Jul	2	39,0	38,6	29,2	35,5
		1	44,5	43,6	33,9	39,0
	Ago	2	58,1	48,6	32,0	41,0
		1	55,6	57,4	44,1	47,1
	Set	2	64,8	60,3	51,5	54,8
		1	61,8	58,6	57,1	55,0

	2	49,5	45,5	63,0	50,1
Out	1	51,7	54,0	66,9	57,5
	2	73,5	79,4	79,7	73,8
Nov	1	62,3	62,4	68,8	62,8
	2	76,2	76,3	81,5	73,5
Dez	1	58,3	52,6	63,3	57,6
	2	63,4	60,6	71,5	62,7

Apêndice M. Estimativa da $EToTho_{ar}$, da $EToMak_{ar}$, da $EToRad_{ar}$ e da $EToJH_{ar}$ referentes aos meses de janeiro de 2001 a dezembro de 2006 em períodos mensais.

Ano	Mês	$EToTho_{ar}$	$EToCam_{ar}$	$EToMak_{ar}$	$EToRad_{ar}$	$EToJH_{ar}$
		mm	mm	mm	mm	mm
2001	Jan	138,0	144,7	139,3	155,8	160,3
	Fev	123,0	124,0	116,4	129,7	138,5
	Mar	123,0	124,1	125,9	133,6	142,4
	Abr	106,0	103,0	113,2	119,0	123,1
	Mai	64,0	77,5	81,0	68,6	65,9
	Jun	57,0	68,1	74,7	48,6	46,0
	Jul	68,0	75,7	84,3	70,8	62,7
	Ago	78,0	89,0	100,0	107,3	91,9
	Set	95,0	109,5	107,0	116,4	102,4
	Out	115,0	130,5	130,6	145,6	136,4
	Nov	129,0	139,4	128,5	141,7	140,7
	Dez	121,0	139,1	124,2	132,3	133,0
2002	Jan	125,0	141,0	123,9	120,8	117,7
	Fev	102,0	117,5	103,4	90,0	99,3
	Mar	128,0	127,5	137,5	137,9	147,8
	Abr	112,0	105,2	120,0	139,8	141,6
	Mai	72,0	81,2	81,4	78,7	77,0
	Jun	68,0	72,6	85,4	72,4	68,6
	Jul	57,0	71,2	77,2	69,4	58,8
	Ago	94,0	96,1	100,3	104,1	95,0
	Set	81,0	103,8	101,7	103,0	91,3
	Out	161,0	147,5	146,8	175,1	171,5
	Nov	126,0	136,5	119,4	147,0	142,1
	Dez	140,0	146,8	133,8	144,9	150,2
2003	Jan	130,0	140,6	111,1	102,3	115,6
	Fev	129,0	126,7	133,8	130,8	145,8
	Mar	117,0	121,5	115,8	125,0	132,6
	Abr	94,0	98,8	103,1	91,6	97,7
	Mai	62,0	76,7	92,9	77,5	71,5
	Jun	70,0	73,2	82,3	69,2	66,3
	Jul	63,0	72,8	84,4	77,7	68,6
	Ago	67,0	84,3	96,2	98,8	83,1
	Set	101,0	112,5	115,2	123,1	112,3

2004	Out	122,0	132,6	123,5	138,8	133,3
	Nov	96,0	93,5	104,1	91,7	92,5
	Dez	144,0	156,9	145,4	145,3	150,5
	Jan	127,0	139,3	122,2	128,2	135,7
	Fev	112,0	122,8	119,0	115,1	119,4
	Mar	111,0	119,1	125,9	128,9	134,5
	Abr	97,0	99,9	99,2	88,7	97,1
	Mai	77,0	82,7	87,6	65,7	68,5
	Jun	53,0	65,0	71,9	43,3	43,1
	Jul	53,0	69,3	81,0	55,5	50,4
	Ago	76,0	89,2	108,0	112,7	97,5
	Set	127,0	121,6	126,5	161,6	146,4
2005	Out	100,0	122,4	104,5	124,4	110,9
	Nov	124,0	138,1	136,6	144,6	135,8
	Dez	127,0	141,4	136,0	158,3	153,2
	Jan	127,0	141,0	110,8	109,3	116,5
	Fev	115,0	121,6	138,5	147,5	149,0
	Mar	121,0	123,9	115,4	132,8	135,9
	Abr	107,0	103,6	110,8	109,1	114,3
	Mai	72,0	80,7	87,9	77,8	75,5
	Jun	63,0	69,9	77,1	57,5	56,0
	Jul	54,0	69,6	80,1	64,6	54,5
	Ago	82,0	91,6	108,6	120,8	102,4
	Set	90,0	107,2	99,7	108,3	95,2
2006	Out	139,0	139,6	129,0	139,6	136,9
	Nov	125,0	136,7	129,7	149,1	141,9
	Dez	121,0	138,9	126,3	140,3	135,7
	Jan	141,0	146,4	140,4	155,5	157,2
	Fev	113,0	120,3	107,2	113,2	120,9
	Mar	124,0	124,9	120,9	114,4	127,4
	Abr	91,0	97,5	108,9	103,3	105,9
	Mai	59,0	75,7	87,2	75,5	66,1
	Jun	58,0	68,8	81,7	68,8	57,7
	Jul	68,0	75,8	86,1	83,9	70,8
	Ago	88,0	92,8	108,8	130,6	111,2
	Set	91,0	107,3	105,4	124,9	106,8
	Out	118,0	131,8	128,8	143,2	135,5
	Nov	124,0	137,3	138,3	162,9	154,2
	Dez	133,0	143,8	120,2	133,1	136,7

Apêndice N. Estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToBC_{ar}$, da $EToBal_{ar}$ e da $EToTrc_{ar}$ referentes aos meses de janeiro de 2001 a dezembro de 2006 em períodos mensais.

Ano	Mês	$EToLin_{ar}$ mm	$EToBC_{ar}$ mm	$EToBal_{ar}$ mm	$EToTrc_{ar}$ mm
2001	Jan	131,3	134,9	151,9	139,4
	Fev	118,2	106,4	115,9	114,9
	Mar	117,0	122,6	126,9	125,0
	Abr	124,3	117,2	94,8	114,5
	Mai	77,9	77,7	63,5	84,1
	Jun	82,5	80,3	56,8	77,4
	Jul	97,9	94,8	64,8	83,0
	Ago	110,6	110,9	86,8	95,3
	Set	115,8	108,9	120,2	106,6
	Out	123,6	125,3	147,5	131,7
	Nov	121,9	119,8	148,6	129,0
	Dez	113,6	118,7	140,0	126,3
2002	Jan	121,8	119,3	141,0	129,9
	Fev	95,3	97,4	109,1	109,4
	Mar	136,1	137,3	145,7	138,5
	Abr	131,1	129,3	94,4	117,9
	Mai	83,7	79,2	62,0	82,6
	Jun	99,0	101,3	55,0	85,2
	Jul	84,1	79,0	61,6	74,5
	Ago	126,3	116,7	91,1	98,9
	Set	92,0	94,4	116,5	101,0
	Out	186,1	171,4	151,8	152,4
	Nov	97,4	107,2	138,9	114,6
	Dez	119,8	126,2	156,7	135,0
2003	Jan	109,0	102,0	126,1	118,2
	Fev	122,5	129,1	140,9	135,1
	Mar	115,2	110,3	113,9	114,9
	Abr	108,4	103,1	90,4	108,6
	Mai	91,9	95,9	69,4	95,7
	Jun	90,5	90,8	59,7	81,8
	Jul	96,2	90,6	59,7	79,9
	Ago	98,1	97,8	86,9	92,7
	Set	130,5	121,7	122,4	116,5
	Out	132,7	123,2	136,9	124,6
	Nov	92,6	118,7	96,3	109,8
	Dez	139,1	135,5	193,5	149,7
2004	Jan	114,2	111,7	134,2	124,7
	Fev	106,6	105,2	123,8	120,8
	Mar	121,7	123,7	124,1	125,1
	Abr	104,5	96,4	89,9	104,1
	Mai	99,9	95,2	69,6	93,2

2005	Jun	64,1	68,8	55,3	74,1
	Jul	76,4	77,7	68,7	79,9
	Ago	121,9	121,7	90,2	102,1
	Set	167,4	153,1	119,7	129,4
	Out	78,6	84,4	129,3	99,4
	Nov	134,3	139,2	156,1	141,3
	Dez	116,3	125,4	155,3	134,5
	Jan	111,6	104,2	124,9	117,0
	Fev	123,2	136,7	140,8	138,1
	Mar	115,5	108,8	115,5	113,6
	Abr	117,9	113,3	100,0	114,5
	Mai	91,2	89,8	65,0	90,6
	Jun	75,9	79,9	58,7	78,0
	Jul	77,7	79,2	64,8	77,7
	Ago	125,0	127,5	91,1	102,6
	Set	88,2	88,6	120,0	98,7
	Out	144,0	135,0	146,5	131,0
	Nov	122,8	129,4	143,9	131,3
	Dez	109,2	116,0	145,9	127,9
2006	Jan	137,9	138,9	154,3	141,8
	Fev	91,7	92,9	109,4	108,0
	Mar	120,6	116,7	129,4	123,8
	Abr	108,8	109,7	92,9	112,7
	Mai	92,5	90,4	62,7	90,1
	Jun	87,2	92,1	55,8	81,7
	Jul	103,6	97,4	63,8	83,4
	Ago	124,1	127,1	91,6	103,7
	Set	102,2	101,9	117,5	102,7
	Out	112,2	117,6	153,6	127,1
	Nov	129,0	136,9	152,4	137,5
	Dez	108,9	107,8	138,3	121,5

Apêndice O. Estimativa da $EToCam_{rg}$, da $EToMak_{rg}$, da $EToRad_{rg}$ e da $EToJH_{rg}$ referentes aos meses de janeiro de 2001 a dezembro de 2006 em períodos quinzenais.

Ano	Mês	Quinzenas	$EToCam_{rg}$	$EToMak_{rg}$	$EToRad_{rg}$	$EToJH_{rg}$
			mm	mm	mm	mm
2001	Jan	1	69,8	69,8	68,3	69,9
		2	73,7	76,6	73,9	76,3
	Fev	1	64,2	51,7	49,5	54,8
		2	62,9	70,6	68,2	71,4
	Mar	1	61,5	61,2	58,7	61,8
		2	63,2	69,5	67,4	70,5
	Abr	1	53,9	57,9	56,0	59,1
		2	50,0	57,0	57,5	58,1
	Mai	1	41,3	43,3	43,7	42,8
		2	38,4	31,4	31,0	32,3
	Jun	1	38,2	38,3	38,3	39,6
		2	32,2	25,8	27,1	26,3
	Jul	1	36,3	37,7	39,5	37,2
		2	41,5	40,6	42,8	40,6
	Ago	1	41,7	51,5	54,9	48,7
		2	49,1	49,7	51,3	48,8
	Set	1	53,9	56,8	59,8	57,1
		2	52,8	49,7	52,6	48,8
	Out	1	59,8	54,2	54,9	54,5
		2	67,4	80,3	80,9	77,1
	Nov	1	66,3	59,2	58,8	59,7
		2	69,6	72,9	71,5	72,8
	Dez	1	67,1	58,0	58,4	58,7
		2	71,2	68,7	65,8	67,3
2002	Jan	1	67,9	55,7	53,8	56,7
		2	71,7	67,0	64,7	67,0
	Fev	1	60,5	54,5	52,4	55,0
		2	59,5	43,9	41,9	46,8
	Mar	1	64,0	73,7	72,2	74,4
		2	62,4	66,3	63,5	67,2
	Abr	1	55,1	66,8	65,9	67,5
		2	51,2	59,7	60,5	61,5
	Mai	1	44,5	41,5	41,2	43,8

2003		2	39,3	36,9	37,5	37,0
		1	38,7	41,2	42,2	42,2
	Jun	2	36,7	38,4	40,1	38,6
		1	34,2	31,1	32,5	30,9
		2	40,6	41,8	44,1	40,9
	Jul	1	45,9	43,8	45,5	45,8
		2	50,9	56,4	60,0	55,4
	Ago	1	49,6	50,6	52,5	49,4
		2	53,3	48,5	50,0	47,3
	Set	1	68,1	77,7	80,5	80,5
		2	74,1	76,6	80,1	78,9
	Out	1	65,5	63,1	65,8	62,8
		2	71,1	62,1	61,7	64,6
	Nov	1	70,4	53,2	52,8	56,3
		2	75,2	84,6	81,6	83,4
	Dez	1	70,5	59,4	56,1	61,6
		2	70,0	49,1	45,6	51,2
	Jan	1	65,8	73,9	70,5	75,0
		2	63,1	61,6	59,2	63,7
	Fev	1	62,8	57,8	55,1	59,8
		2	60,0	63,0	61,2	62,6
	Mar	1	49,8	42,2	40,8	43,5
		2	49,4	56,4	54,8	57,3
	Abr	1	38,3	40,9	40,7	39,0
		2	39,5	45,5	45,6	43,4
	Mai	1	39,1	37,5	37,1	39,6
		2	35,7	39,9	40,6	38,9
	Jun	1	34,9	35,5	36,8	34,6
		2	41,2	46,5	47,4	45,0
	Jul	1	41,1	40,5	41,8	39,9
		2	44,8	56,6	57,6	50,8
	Ago	1	49,9	53,2	54,7	51,3
		2	59,0	63,2	64,6	63,4
	Set	1	60,5	60,5	61,6	60,1
		2	69,1	67,1	67,1	67,3
	Out	1	66,2	70,7	71,2	69,4
		2	67,4	59,5	58,4	60,2
	Nov	1	69,9	59,5	57,4	61,1
		2	75,5	86,4	86,4	85,3
	Dez					

2004	Jan	1	68,4	62,9	58,6	63,2
		2	70,9	62,6	60,0	62,8
	Fev	1	61,7	62,7	60,0	62,5
		2	63,2	57,5	53,2	58,1
	Mar	1	61,7	60,4	56,9	61,4
		2	58,0	69,8	67,0	66,9
	Abr	1	52,5	49,3	46,7	50,9
		2	47,4	46,5	44,6	47,9
	Mai	1	40,1	29,8	29,2	31,8
		2	36,8	32,3	30,9	32,0
	Jun	1	32,7	24,6	24,3	25,7
		2	35,6	36,7	36,1	36,5
	Jul	1	36,7	33,8	33,0	34,5
		2	34,6	39,2	39,3	34,6
	Ago	1	38,1	47,2	48,9	42,4
		2	51,8	63,4	64,2	61,7
	Set	1	56,3	67,4	71,5	67,7
		2	61,7	68,0	73,0	69,4
	Out	1	56,3	45,8	47,8	45,9
		2	65,8	61,3	63,0	60,4
	Nov	1	66,5	67,0	69,4	66,5
		2	67,0	68,6	70,0	67,4
	Dez	1	67,0	74,1	73,2	71,6
		2	72,9	69,4	68,0	68,8
2005	Jan	1	68,8	60,5	58,2	61,5
		2	70,8	49,1	46,9	51,5
	Fev	1	60,9	73,2	72,6	70,7
		2	63,0	68,9	68,7	70,0
	Mar	1	63,5	66,6	65,9	67,9
		2	60,5	55,4	53,1	56,8
	Abr	1	57,0	66,4	65,6	68,9
		2	47,4	42,9	42,4	44,5
	Mai	1	41,5	47,0	47,6	45,9
		2	41,2	35,5	35,5	37,0
	Jun	1	37,2	38,9	39,1	39,2
		2	35,7	34,0	34,1	32,4
	Jul	1	34,5	35,5	37,2	34,2
		2	38,1	38,5	39,3	36,4
	Ago	1	40,2	50,3	52,5	46,5
		2	52,2	61,4	65,5	60,6

2006	Set	1	52,1	52,3	54,6	52,0
		2	52,9	47,3	48,5	46,5
	Out	1	66,6	67,4	70,1	70,3
		2	68,5	63,0	63,7	63,3
	Nov	1	66,6	76,5	78,9	74,7
		2	68,6	56,0	57,6	58,0
	Dez	1	65,8	51,8	51,0	52,6
		2	72,1	77,8	77,4	75,5
	Jan	1	67,9	59,4	58,1	59,8
		2	76,4	86,3	85,2	86,5
	Fev	1	63,4	62,5	60,2	63,3
		2	60,4	47,1	44,7	50,0
	Mar	1	63,5	69,2	66,5	70,1
		2	61,4	51,5	48,7	54,1
	Abr	1	52,6	54,4	52,9	55,2
		2	46,2	52,0	51,7	51,0
	Mai	1	37,8	44,8	45,8	41,2
		2	38,9	35,9	36,6	35,8
	Jun	1	36,0	39,3	40,7	38,5
		2	34,4	35,8	37,8	35,0
	Jul	1	36,9	40,0	41,7	39,4
		2	41,0	43,7	46,9	42,7
	Ago	1	44,8	52,0	55,5	51,7
		2	49,5	62,5	66,6	59,3
	Set	1	50,5	57,9	62,5	55,6
		2	55,2	50,1	51,9	50,4
	Out	1	60,7	53,5	52,7	54,5
		2	67,4	79,0	80,7	76,2
	Nov	1	63,1	67,3	68,6	64,8
		2	71,1	77,5	78,4	77,9
	Dez	1	68,2	60,3	58,8	61,0
		2	74,0	64,5	61,3	65,5

Apêndice P. Estimativa da $EToLin_{rg}$, da $EToBC_{rg}$, da $EToBal_{rg}$ e da $EToTrc_{rg}$ referentes aos meses de janeiro de 2001 a dezembro de 2006 em períodos quinzenais.

Ano	Mês	Quinzenas	$EToLin_{rg}$ mm	$EToBC_{rg}$ mm	$EToBal_{rg}$ mm	$EToTrc_{rg}$ mm
2001	Jan	1	*	*	71,1	68,4
		2	*	*	75,6	75,0
	Fev	1	*	*	61,9	51,5
		2	*	*	69,3	68,7
	Mar	1	*	*	64,8	60,4
		2	*	*	65,6	68,6
	Abr	1	*	*	57,6	57,2
		2	*	*	50,8	56,4
	Mai	1	*	*	43,1	42,9
		2	*	*	39,5	32,1
	Jun	1	*	*	37,9	38,7
		2	*	*	33,5	25,6
	Jul	1	*	*	34,9	37,6
		2	*	*	38,9	41,1
	Ago	1	*	*	39,1	52,1
		2	*	*	48,0	50,1
	Set	1	*	*	51,9	57,1
		2	*	*	53,1	49,4
	Out	1	*	*	58,9	53,7
		2	*	*	69,3	82,3
	Nov	1	*	*	63,6	58,6
		2	*	*	72,3	71,2
	Dez	1	*	*	64,0	57,3
		2	*	*	72,8	67,5
2002	Jan	1	51,2	49,8	64,3	55,4
		2	54,7	57,7	71,2	66,1
	Fev	1	46,1	45,8	62,3	53,7
		2	44,7	43,5	57,2	44,1
	Mar	1	59,2	65,0	68,8	72,1
		2	55,4	58,8	65,9	65,5
	Abr	1	59,0	62,5	59,4	65,5
		2	63,3	66,5	51,4	59,1
	Mai	1	51,7	46,6	44,1	42,1
		2				

2003		2	48,3	44,1	39,2	37,2
		1	54,3	53,5	36,7	41,4
	Jun	2	53,9	52,5	34,0	38,5
		1	46,9	41,9	34,0	31,0
		2	59,4	53,8	37,3	43,0
	Jul	1	61,9	57,1	42,0	45,5
		2	71,5	68,9	46,1	59,8
		1	58,5	56,9	50,3	50,0
	Set	2	53,7	48,1	53,1	49,2
		1	83,1	86,1	62,7	85,3
		2	80,5	79,7	67,1	80,6
	Nov	1	60,6	62,9	63,8	62,6
		2	58,3	57,2	67,0	61,5
		1	54,0	52,0	63,6	53,3
	Dez	2	58,9	68,8	80,5	82,4
		1	51,3	51,0	67,6	59,0
		2	48,5	43,8	63,1	49,6
	Fev	1	54,6	60,9	71,9	71,9
		2	52,4	54,3	64,6	60,6
		1	52,9	50,6	62,9	57,4
	Mar	2	55,1	57,3	62,9	62,2
		1	47,0	40,2	50,5	42,4
		2	55,5	57,1	52,0	55,8
	Mai	1	44,7	42,4	41,8	39,9
		2	50,8	51,0	40,7	44,9
		1	48,8	46,0	38,8	38,1
	Jun	2	50,9	50,7	34,3	39,6
		1	49,8	46,1	33,5	35,4
		2	60,7	57,0	38,2	46,2
	Ago	1	54,4	50,6	39,8	40,7
		2	60,8	59,8	45,9	59,0
		1	59,9	58,5	50,2	53,5
	Set	2	70,9	66,6	55,4	68,1
		1	63,5	61,6	58,5	62,3
		2	71,1	65,1	63,3	71,2
	Nov	1	63,2	66,0	66,4	71,3
		2	54,1	53,0	65,6	58,8
		1	53,0	52,7	66,8	59,0
	Dez	2	64,2	75,8	79,3	84,1

2004	Jan	1	50,3	51,9	69,2	61,9
		2	55,4	55,0	68,1	62,1
	Fev	1	49,7	52,3	65,9	61,2
		2	49,1	44,9	64,1	56,9
	Mar	1	52,1	51,4	63,9	59,7
		2	56,2	62,0	63,9	68,1
	Abr	1	50,3	45,1	54,1	49,3
		2	49,4	47,0	49,5	46,5
	Mai	1	43,4	34,4	40,7	30,6
		2	40,5	35,1	39,7	32,3
	Jun	1	37,2	30,7	34,8	24,8
		2	46,0	44,1	36,0	36,7
	Jul	1	44,3	39,8	37,4	34,2
		2	43,2	40,4	38,5	37,5
	Ago	1	50,4	53,6	41,3	45,3
		2	70,7	70,8	49,3	64,0
	Set	1	80,1	83,0	50,9	74,2
		2	79,8	79,1	56,1	74,5
	Out	1	52,3	47,5	53,7	47,8
		2	58,6	56,9	64,2	60,5
	Nov	1	59,7	63,8	66,4	65,6
		2	58,4	61,6	67,5	67,7
	Dez	1	53,5	62,3	72,8	72,0
		2	56,4	59,8	72,4	68,4
2005	Jan	1	50,2	52,0	68,0	59,8
		2	49,8	45,5	62,8	49,7
	Fev	1	51,9	61,2	69,7	70,6
		2	56,0	62,6	66,8	67,3
	Mar	1	56,8	59,8	66,0	65,4
		2	51,9	50,8	60,6	55,4
	Abr	1	60,5	63,1	60,4	65,5
		2	49,4	45,3	48,7	43,3
	Mai	1	50,4	50,4	43,7	46,3
		2	48,3	41,8	40,5	36,5
	Jun	1	47,5	46,7	37,6	39,0
		2	44,0	39,8	37,2	34,7
	Jul	1	45,9	44,7	35,3	35,0
		2	46,5	42,2	39,9	38,4
	Ago	1	55,0	59,6	41,4	48,8
		2	70,7	73,2	49,3	62,2

2006	Set	1	55,4	56,3	53,3	51,8
		2	49,9	46,1	54,0	47,1
	Out	1	69,5	71,3	63,1	67,7
		2	60,2	58,0	65,9	62,5
	Nov	1	62,3	71,6	70,4	74,3
		2	57,2	55,0	63,1	55,8
	Dez	1	48,5	47,7	62,8	51,6
		2	57,1	66,1	76,2	75,9
	Jan	1	51,5	52,7	66,3	58,7
		2	65,5	75,9	79,0	84,2
	Fev	1	48,6	51,1	67,0	61,3
		2	45,2	42,8	59,1	47,1
	Mar	1	53,6	57,7	68,8	67,9
		2	51,3	47,8	59,9	51,9
	Abr	1	50,7	49,2	56,0	54,0
		2	50,4	52,5	49,9	51,2
	Mai	1	47,6	47,5	41,3	43,3
		2	47,5	42,6	39,2	36,4
	Jun	1	49,3	49,5	35,5	39,0
		2	47,9	47,2	33,8	35,5
	Jul	1	51,3	51,2	35,8	39,8
		2	63,1	58,3	36,0	45,6
	Ago	1	65,5	68,3	41,3	53,9
		2	70,8	73,9	47,4	66,4
	Set	1	65,9	68,2	49,6	61,3
		2	55,1	51,6	54,9	49,8
	Out	1	50,6	49,2	60,6	53,2
		2	64,2	70,3	71,0	77,9
	Nov	1	54,6	60,6	67,5	65,3
		2	61,9	68,8	73,1	75,6
	Dez	1	50,3	52,4	67,5	59,5
		2	53,4	54,0	71,3	64,0

*A *ETo* não foi estimada devido a baixa eficiência deste ajuste nesta metodologia

Apêndice Q. Estimativa da $EToTho_{rg}$, da $EToMak_{rg}$, da $EToRad_{rg}$ e da $EToJH_{rg}$ referentes aos meses de janeiro de 2001 a dezembro de 2006 em períodos mensais.

Ano	Mês	$EToTho_{rg}$ mm	$EToCam_{rg}$ mm	$EToMak_{rg}$ mm	$EToRad_{rg}$ mm	$EToJH_{rg}$ mm
2001	Jan	142,4	143,2	148,9	144,8	148,1
	Fev	130,1	126,9	123,1	118,2	126,9
	Mar	129,6	124,6	132,2	127,3	133,4
	Abr	114,6	104,1	115,1	113,6	117,6
	Mai	77,9	80,2	72,0	71,6	72,9
	Jun	70,9	71,1	60,6	61,6	62,9
	Jul	80,3	78,4	75,8	79,9	76,2
	Ago	89,7	91,2	100,5	105,8	97,0
	Set	103,3	107,1	106,2	112,4	105,5
	Out	121,4	127,0	136,2	137,7	132,5
	Nov	133,3	135,7	133,6	131,9	133,4
	Dez	128,1	138,0	127,9	125,2	126,7
2002	Jan	130,7	139,0	123,6	119,1	124,3
	Fev	111,5	120,0	97,5	92,9	101,4
	Mar	133,1	126,3	142,1	137,8	143,0
	Abr	120,5	106,5	127,6	127,7	129,9
	Mai	85,3	84,1	76,0	76,0	79,0
	Jun	81,4	76,1	77,2	79,8	79,3
	Jul	71,3	75,4	70,0	73,7	69,7
	Ago	103,2	97,1	99,4	104,9	100,8
	Set	92,4	103,2	98,2	101,8	96,1
	Out	161,2	141,8	157,4	164,7	161,9
	Nov	133,8	136,3	126,1	128,8	128,4
	Dez	144,8	145,2	139,7	136,3	141,1
2003	Jan	135,6	140,2	108,3	100,9	112,5
	Fev	135,3	128,8	137,3	131,2	140,0
	Mar	125,1	122,7	121,5	116,7	123,1
	Abr	103,6	99,7	97,6	94,2	99,9
	Mai	75,1	78,5	84,5	84,2	81,0
	Jun	82,2	75,4	74,9	74,9	77,0
	Jul	77,2	76,7	79,8	81,9	77,8
	Ago	80,2	86,5	96,0	98,4	89,8
	Set	108,3	108,9	116,8	120,0	114,6

2004	Out	127,7	129,4	128,7	130,1	128,2
	Nov	105,2	93,8	96,2	93,4	96,8
	Dez	145,8	145,0	148,5	146,5	148,0
	Jan	133,1	139,0	126,6	119,2	126,8
	Fev	120,5	124,9	120,8	113,4	116,5
	Mar	118,8	119,6	131,6	124,9	129,4
	Abr	106,1	100,1	94,6	89,6	98,2
	Mai	88,7	84,1	76,0	76,0	79,0
	Jun	68,0	69,1	57,6	56,1	59,3
	Jul	67,5	72,1	70,2	69,0	67,3
	Ago	87,4	89,9	110,5	113,2	103,3
	Set	131,2	118,0	137,1	147,2	138,4
2005	Out	110,5	122,0	106,7	110,8	105,8
	Nov	128,2	133,3	137,4	141,8	135,2
	Dez	132,9	139,6	145,9	143,6	142,1
	Jan	132,8	139,3	109,4	104,6	113,1
	Fev	122,4	123,9	144,4	143,8	142,5
	Mar	127,4	123,8	122,8	119,6	125,1
	Abr	115,5	104,4	109,1	107,7	112,4
	Mai	85,1	83,3	80,3	80,8	81,5
	Jun	76,4	73,5	66,3	66,3	68,9
	Jul	68,8	73,3	71,2	73,6	68,5
	Ago	92,8	92,5	111,8	118,6	106,8
	Set	99,1	105,3	98,7	102,3	97,8
2006	Out	141,7	135,0	131,8	135,6	134,6
	Nov	131,6	134,9	134,1	138,5	133,9
	Dez	127,2	137,6	131,0	129,9	128,7
	Jan	144,6	143,9	148,2	146,0	147,5
	Fev	122,1	123,7	109,5	104,3	113,3
	Mar	129,9	124,7	121,4	115,5	124,6
	Abr	101,3	99,0	106,0	104,1	106,0
	Mai	72,4	77,5	78,5	79,9	75,5
	Jun	71,4	71,2	72,4	75,8	71,5
	Jul	81,0	78,5	81,6	86,7	80,7
	Ago	99,0	94,8	114,7	122,9	111,1
	Set	100,8	105,9	107,7	114,7	105,9
	Out	124,0	128,0	134,0	135,2	131,8
	Nov	129,4	133,9	147,2	149,9	144,1
	Dez	137,7	141,9	125,8	120,8	127,4

Apêndice R. Estimativa da $EToLin_{ar}$, da $EToBC_{ar}$, da $EToBal_{ar}$ e da $EToTrc_{ar}$ referentes aos meses de janeiro de 2001 a dezembro de 2006 em períodos mensais.

Ano	Mês	$EToLin_{rg}$ <i>mm</i>	$EToBC_{rg}$ <i>mm</i>	$EToBal_{rg}$ <i>mm</i>	$EToTrc_{rg}$ <i>mm</i>
2001	Jan	*	*	145,6	145,5
	Fev	*	*	130,6	120,8
	Mar	*	*	129,9	130,1
	Abr	*	*	108,5	113,8
	Mai	*	*	83,6	72,5
	Jun	*	*	72,7	61,2
	Jul	*	*	75,0	76,4
	Ago	*	*	87,8	101,6
	Set	*	*	105,3	106,2
	Out	*	*	127,7	137,7
	Nov	*	*	135,2	131,1
	Dez	*	*	136,0	125,7
2002	Jan	105,6	106,8	134,8	122,1
	Fev	90,7	87,6	119,3	96,8
	Mar	114,1	123,9	134,0	139,4
	Abr	121,6	129,6	110,9	125,5
	Mai	99,7	88,9	84,2	77,1
	Jun	107,9	105,3	72,0	77,7
	Jul	105,8	94,0	72,6	71,4
	Ago	132,6	126,3	88,8	104,9
	Set	111,8	103,9	103,7	98,3
	Out	162,2	168,4	129,2	169,5
	Nov	118,4	120,1	130,2	124,9
	Dez	112,5	120,7	143,0	137,3
2003	Jan	99,5	93,0	130,2	108,4
	Fev	106,8	114,8	135,8	133,9
	Mar	107,7	107,2	125,4	120,2
	Abr	102,2	95,1	102,8	97,3
	Mai	95,3	91,7	83,4	83,0
	Jun	99,6	95,5	74,3	75,5
	Jul	110,0	102,0	73,0	79,6
	Ago	114,8	109,8	86,5	99,0
	Set	129,8	125,5	105,8	122,2

2004	Out	133,8	127,2	121,5	135,0
	Nov	100,1	114,6	98,9	95,4
	Dez	116,6	128,1	145,1	145,2
	Jan	105,4	106,3	136,5	124,8
	Fev	98,6	95,5	129,4	118,5
	Mar	108,0	113,0	127,4	128,9
	Abr	99,6	90,5	103,8	94,8
	Mai	99,7	88,9	84,2	77,1
	Jun	83,2	71,3	72,1	58,1
	Jul	87,5	78,1	77,1	69,0
	Ago	119,9	124,7	91,3	109,1
	Set	158,6	164,7	107,3	151,2
2005	Out	110,4	103,4	117,7	108,1
	Nov	117,5	125,8	133,2	134,7
	Dez	109,6	122,4	144,2	142,3
	Jan	99,9	96,0	130,2	109,4
	Fev	107,5	124,2	135,7	139,7
	Mar	108,3	109,6	126,2	121,5
	Abr	109,2	106,7	109,2	108,6
	Mai	98,5	90,2	85,0	80,9
	Jun	90,9	83,4	74,7	67,3
	Jul	92,4	84,9	76,3	70,9
	Ago	124,7	133,7	91,4	111,0
	Set	105,0	101,1	107,5	98,0
2006	Out	128,8	129,1	128,5	131,5
	Nov	119,0	126,6	132,8	131,4
	Dez	105,3	112,8	138,1	128,6
	Jan	116,3	128,2	144,3	145,0
	Fev	93,7	92,1	125,7	108,2
	Mar	104,7	104,2	128,2	120,3
	Abr	100,9	100,7	106,2	104,7
	Mai	95,1	88,3	81,5	77,6
	Jun	97,1	95,4	70,7	72,0
	Jul	114,0	109,1	73,1	83,6
	Ago	135,4	143,6	89,5	120,9
	Set	120,5	119,2	104,7	111,0
2006	Out	114,4	118,7	131,0	132,4
	Nov	115,8	129,9	139,7	142,9
	Dez	103,4	105,7	138,0	124,3

*A *ETo* não foi estimada devido a baixa eficiência deste ajuste nesta metodologia

7. REFERÊNCIAS

- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO. 1982, 68p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 39).
- ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; JENSEN, M.E. **Environmental requirements of lisimeters**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LYSIMETRY, 1., 1991, Honolulu. **Proceedings...** New York: ASCE, 1991. p.170-81.
- ALLEN, R.G; PEREIRA, L.S; RAES, D.; MARTIN, S. **Crop Evapotranspiration**. Rome: FAO. 1998, 297p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; Raes, D.; Smith, M.; Pereira L.S. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 131, n. 1, p. 14-23, 2005.
- AMATYA, D.M.; SKAGGS, R.W.; GREGORY, J.D. Comparason of estimating REF-ET. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 121, n. 6, p.427-435, 1995.
- BARRETO, C.E.A.G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. 2005, 249f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Sanamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2006.
- BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981, 95p. (Boletim Técnico, 7).

- BERNAL, P.L. (1996). **Measured and Calculated Evapotranspiration in South Havana, Cuba**. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE, November 3-6, 1996, San Antonio, Texas. **Anais...** Evapotranspiration and Irrigation Scheduling ASAE, 1996, p. 924-927.
- BOX, G.E.P.; JENKINS, G.M. **Times Series Analysis: Forecasting and control**. 3º ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994, 598p.
- CAMARGO, A.P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**. v. 21, n. 121, p. 163-213, 1962.
- CAMARGO, A.P. CAMARGO, M.B.P.; Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas. v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.
- CAMARGO, A.P; MARIN, F.R; SENTELHAS, P.C; PICINI, A.G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.251-7, 1999.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria. v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CHIEW, F.H.S.; KAMALADASA, N.N.; MALANO, H.M.; MCMAHON, T.A. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Austrália. **Agricultural Water Management**. v. 28, p. 9-21, 1995.
- CHOUDHURY, B.J.; REGINATO, R.J.; IDSO, S.B. Analysis of infrared temperature observation of wheat crop for estimating evaporation by an infra-red temperature based energy balance equation. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 37, p. 75-88, 1986.
- CONCEIÇÃO, M.A.F.; MARIN, F.R. Estimativa da evapotranspiração de referência utilizando os métodos de Hargreaves-Samani e do tanque Classe A. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14. 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2005.

- COSTA, M.H. (1994). **Balanço Hídrico segundo Thornthwaite e Mather, 1955**. Viçosa: Dep. Engenharia Agrícola/UFV. 14p. (Caderno Didático - Série 19).
- CUNHA, A.T. **Estimativa experimental da taxa de recarga na zona de afloramento do Aquífero Guarani, para a região de São Paulo – SP**. 2003. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2003.
- DIEZ, J, FERRATI, R, (200-). Disponível em: <<http://users.exa.unicen.edu.ar/~jdiez/links/cstierra/apuntes/unidad3.pdf>> Ultimo acesso em 08 de agosto de 2006.
- DOORENBOS, J; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO. 1975, 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24)
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2.ed. New York, Wiley & Sons, 1981, 508p.
- FERREIRA, V.M.; VALENZUELA, A. **Cálculo de la evapotranspiración potencial para Chile. Chillán, Región del Bío-Bío**. Chillán-Chile, 1976. 232 p. (Boletín Técnico - Universidad de Concepción. Escuela de Agronomía. Dept. de Ingeniería Agrícola - Chile. N.15)
- FIGUEIREDO, F.P.; SOARES, A.A.; COSTA, L.C.; RAMOS, M.M.; OLIVEIRA, F.G. Análise comparativa das estimativas da evapotranspiração de referência, pelos métodos de Penman-Monteith e tanque Classe “A”, nas condições edafoclimáticas do norte de Minas Gerais. **Unimontes Científica**, Montes Claros. v.4, n.2, jul./dez, 2002.
- FISHER, J.B.; DEBIASE, T.A.; QI, Y.; XU, M.; GOLDSTEIN, A.H. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. **Environmental Modelling & Software**. v. 20, p. 783-796, 2005.

- FONTENOT, RL. **An evaluation of reference evapotranspiration models in Louisiana.** 1999, 77f. Dissertação (Mestrado em Natural Sciences). Louisiana State University and A & M College, 1999.
- FRANCISCO, W. **Estatística básica: síntese de teoria, exercícios propostos e resolvidos.** Piracicaba : Unimep, 1993, 219 p.
- FREVERT, C.R.; HILL, R.W.; BRAATEN, B.C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation. and Drainage.** Eng., ASCE. v. 109, p. 265-270, 1983.
- GRANGER, R.J.; GRAY, D.M. Evaporation from natural nonsaturated surfaces. **J. Hydrol.** v.111, p.21-29, 1989.
- HENGGELE, J.C.; SAMANI, Z.; FLYNN, M.S.; ZEITLER, J.W. **Evaluation of various evapotranspiration equations for Texas and New Mexico.** In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE, November 3-6, 1996, San Antonio, Texas. **Anais...** Evapotranspiration and Irrigation Scheduling ASAE, 1996, p. 962-967.
- JACOBS, J.M. **Evaluation of reference evapotranspiration methodologies and AFSIRS crop water use simulation model.** 2001, 114f. Dissertação (Iniciação Científica) - University of Florida Gainesville, Florida, 2001.
- JAMES, L.G. **Principles of farm irrigation system design.** New York: John Wiley & Sons, 1988, 543p.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements.** New York: American Society of Civil Engineers, 1989. 329 p. (ASCE Manual and Report on Engineering Practice, 70).
- KASHYAP, P.S.; PANDA, R.K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crops in a sub-humid region. **Agricultural Water Management.** v.50, p.9-25, 2001.

- LINACRE, E.T. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**. Amsterdam. v.18, n.1, p.409-424, 1977.
- LÓPEZ-URREA, R.; MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.; FABEIRO, C.; MORATALLA, A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**. v.85, p.15-26, 2006.
- LYRA, G.B.; PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; LYRA, G.B.; SANTIAGO, A.V.; FOLEGATTI, M.V. Média diária do déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar e sua influência na evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith (FAO 56) em Piracicaba – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal. v. 24, n. 2, p. 328-337, 2004.
- MACHADO, R.E. **Desenvolvimento e utilização de um lisímetro para a determinação da evapotranspiração de referência**. 1996, 93f. Dissertação (Mestrado em hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 1996.
- MARQUES, V.S. **Sobre as limitações dos evapotranspirômetros**. 1972, 56f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 1972.
- MARTÍNEZ-COB, A; TEJERO-JUSTE, M. A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ETo estimation equation in semiarid regions. **Agricultural Water Management**. v. 64, p. 251–264, 2004.
- MATTOS, A. **Evapotranspiração na hidrologia: média real e espacial**. 1997, 61f. Tese (Livre Docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 1997.

- MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE.** 2002, 103f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, SP, 2002.
- MEDEIROS, A.T; SENTELHAS, P.C.; LIMA, R.N. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba – CE. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal. v. 23, n. 1, p. 31-40, 2003.
- MEDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; BERNARDO, S; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W.O. **Estatística Básica.** 4.ed. São Paulo : Atual, 1987, 321p.
- MORETTIN, P.A.; TOLOI, C.M.C. **Análise de séries temporais.** 2.ed. – São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006, 538p.
- MORTON, F.I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. **Journal of Hydrology.** v.66, p.1-76, 1983.
- NELSON, C.R. **Applied Time Series Analysis for Managerial Forecasting.** San Francisco: Holden- Day, 1973, 231p.
- OLIVEIRA, L.F.C.; CARVALHO, D.F.; ROMÃO, P.A.; CORTÊS, F.C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência no estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 31, n. 2, p. 121-126, 2001.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from water, bare soil and grass. **Proc. Roy. Soc. A.**, London. v. 193, p. 120-143, 1948.

- PEREIRA, A.R.; PRUITT, W.O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**. v. 66, n. 251–257, 2004.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba, FEALQ, 1997, 183p.
- PERES, J.G.; PEREIRA, A.R.; FRIZZONE, J.A. Avaliação do modelo de Penaman-Monteith para estimativa da Evapotranspiração de Referência padronizado pela FAO. **Eng. Rural**, v. 6, n.1, p.65-75, 1995.
- RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos, EESC/USP. EDUSP, 1998, 840p.
- RIGHI, E.Z. **Balanco de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004, 151f. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, SP, 2004.
- RITCHIE, J.T.; HOWELL, T.A.; MEYER, W.S.; WRIGHT, J.L. **Sources of biased errors in evaluating evapotranspiration equation**. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE, November 3-6, 1996, San Antonio, Texas. **Anais...** Evapotranspiration and Irrigation Scheduling ASAE, 1996, p. 147-157.
- SALGADO, E. **Curso relación suelo agua planta**. Serie Ciencias Naturales. Universitarias de Valparaíso. Valparaíso, Región de Valparaíso. Chile, 2001, 184p.
- SÁNCHEZ, F.J. (2001). *Evapotranspiración*. Universidad de Salamanca. (<http://www.digeo.cl/asignaturas/h-h/Evapotranspiracion2.pdf>) última visita em 13/01/2007.
- SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria. v. 4, n.1, p. i-xii, 1996.

- SENTELHAS, P.C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação de meteorologia convencional e automática.** 1998, 97f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, SP, 1998.
- SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p. 53-58, 1999.
- SILVA, L.D.B.; FOLEGATTI, M.V.; VILLA NOVA, N.A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.
- SILVA, K.O.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N., FOLEGATTI, M.V. Análise de métodos de estimativa de evapotranspiração na otimização de sistemas de drenagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.2, p.161-165, 2005.
- SMITH, M; ALLEN, R; PEREIRA, P. Revised FAO methodology for crop water requirements. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE, November 3-6, 1996, San Antonio, Texas. **Anais...** Evapotranspiration and Irrigation Scheduling ASAE, 1996, p. 116-123.
- THORNTHWAITE, CW. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**. v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- TUCCI, C.E.M. (organizador). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2.ed. – Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, 2001. 952p
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: Enfrentando a escassez**. Rima. Instituto Internacional de Ecologia São Carlos, 2003. 248p.
- VALDIVIA, PG. **Monitoramento hidrogeológico da bacia-piloto do ribeirão da Onça em zona de afloramento do sistema aquífero Guarani determinação da**

- evapotranspiração.** 2005. 43f. Dissertação de iniciação científica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2005.
- VESCOVE, H.V.; TURCO, J.E. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara – SP. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v. 25, n. 3, p. 713-721, 2005.
- VILLAMAN, R; TIJERINA, L; QUEVEDO, A; CRESPO, G. Comparacion de algunos metodos micrometeorologicos para estimar la evapotranspiracion, en el area de Montecillo, México. **Terra**, v. 19, p. 281-291, 2001.
- Xu, C-Y.; Chen, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, v.19, p. 3717-3734, 2005.