

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Sistema de Estimativa da Evapotranspiração – SEVAP
Autor: Adelgício Farias Belo Filho
Dezembro - 2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

SISTEMA DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
SEVAP

ADELGICIO FARIAS BELO FILHO

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro de 2003

ADELGICIO FARIAS BELO FILHO

**SISTEMA DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
SEVAP**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Mestre.

Área de Concentração: Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia

Orientadores:

Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva
Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Campina Grande - PB
Dezembro de 2003



FICHA CATALOGRÁFICA

B452s
2003

Belo Filho, Adelgicio Farias

Sistema de estimativa da evapotranspiração - SEVAP
Adelgicio Farias Belo Filho - Campina Grande: UFCC, 2003.

66p. : il.

Inclui bibliografia

Dissertação (Mestrado em Meteorologia)

UFCC/CCT/DCA.

1. Evapotranspiração de referência 2. Métodos de evapotranspiração de referência 3. Planejamento de irrigação 4. Software para estimar a evapotranspiração de referência

1. Título


CDU: 556.13


ADELGÍCIO FARIAS BELO FILHO

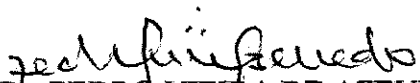
SISTEMA DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO – SEVAP

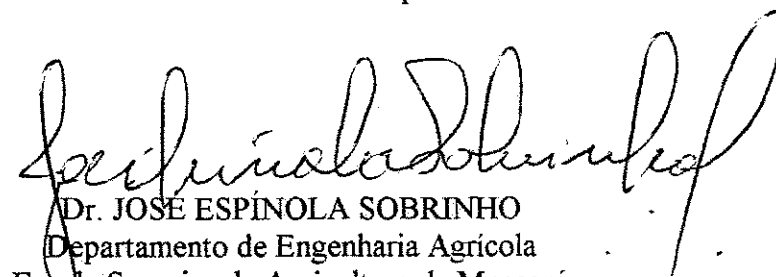
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/12/2003

BANCA EXAMINADORA


Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Dr. JOSÉ ESPÍNOLA SOBRINHO
Departamento de Engenharia Agrícola
Escola Superior de Agricultura de Mossoró

Cântigo do Sol

*Ó Altíssimo, onipotente, bom Senhor,
a Ti os louvores, a glória,
a honra e todo o bendizer.*

*A ti somente, ó Altíssimo,
se devem todas as homenagens
e homem algum é digno de proferir Teu nome.*

Louvado sejas, Senhor meu,
com todas as tuas criaturas,
em especial pelo importante irmão sol,
que faz o dia e com que nos ilumina,
ele é belo e radiante, cheio de esplendor,
e de Ti, ó Altíssimo, traz significação.

Louvado sejas, Senhor meu,
pela irmã lua e pelas estrelas,
no céu as formastes, claras, preciosas e belas.

Louvado sejas, meu Senhor,
pelo irmão vento e o ar e as nuvens,
e o céu sereno e toda espécie de tempo,
pelo qual às tuas criaturas dás sustento.

Louvado sejas, meu Senhor,
pela irmã água, a qual é muito útil
e humilde e preciosa e casta.

Louvado sejas, meu Senhor,
por nossa irmã e mãe terra,
que nos alimenta e governa
e produz variados frutos
e coloridas flores e ervas.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, a Jesus e a Virgem Maria.

Aos meus pais, irmãos e esposa Analice, meus filhos Andrea e Anderson.

Ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas e todos os funcionários, pela estrutura didático-científica.

Ao Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, pela orientação, colaboração, incentivo, amizade, sugestões e especial dedicação na orientação do início até a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, Coordenador do Curso de Mestrado em Meteorologia, pela orientação, incentivo, ajuda e companheirismo para com os alunos do mestrado e, fundamental contribuição na orientação deste trabalho.

Ao amigo João Hugo Baracuy da Cunha Campos, aluno do Curso de Graduação em Meteorologia, pelo grande incentivo e colaboração prestada para a realização deste trabalho.

A funcionária Eng^a. Eyres Diana Ventura Silva e, em especial, a Divanete Cruz Rocha, secretária do Curso de Mestrado em Meteorologia, pela atenção, apoio e assistência.

A EMBRAPA, pelo fornecimento dos dados utilizados.

Aos colegas do mestrado, e aos demais amigos que de alguma forma, contribuíram na elaboração deste trabalho.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A maioria dos usuários da agricultura irrigada no Brasil não utiliza qualquer tipo de estratégia de uso e manejo racional da água na irrigação e o monitoramento automático ainda é incipiente. Assim, foi desenvolvido um programa computacional denominado SEVAP (Sistema de Estimativa de Evapotranspiração) com o objetivo de se estimar a evapotranspiração através de diversos métodos de estimativa. Os métodos apresentados no sistema são: Penman-Monteith (FAO/56), Hargreaves, Jensen-Haise, Linacre, Makkink, Priestley & Taylor, Tanque "Classe A" e Thornthwaite. Esses métodos podem ser utilizados em função da disponibilidade de dados e da precisão desejada. O modelo SEVAP foi desenvolvido em linguagem computacional *Delphi*, versão 5.0, e pode ser instalado e operado em microcomputadores *Pentium*, com no mínimo 150 MHz e 32 MB RAM, em ambientes Win 95, ou superior, e Win NT. A eficiência do SEVAP foi avaliada com a aplicação dos dados climatológicos da estação de climatológica de Petrolina, PE, referentes ao ano de 2002. Foram utilizadas as médias mensais desse ano, bem como os valores diários dos meses de março e agosto, do ano de 2003, das seguintes variáveis climatológicas: temperaturas máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, insolação, velocidade do vento, evaporação do Tanque "Classe A" e radiação global. Adicionalmente, foram comparadas as estimativas da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith utilizando-se os "softwares" SEVAP e CROPWAT, cujas estimativas exibiram alto coeficiente de determinação (0,96). Os resultados deste trabalho evidenciam que o modelo SEVAP possibilita estimativas confiáveis e contínuas da evapotranspiração. Além disso, ele pode ser utilizado no monitoramento local e regional da evapotranspiração potencial em escala diária ou mensal. Na ausência de dados insolação e velocidade do vento, a evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith pode ser substituída com razoável precisão pelo método de Hargreaves.

ABSTRACT

Most users of the irrigated areas in Brazil do not use any type of strategy and rational management of water in their irrigated projects. The automatic monitoring is still incipient. In this sense, a software called Evapotranspiration Estimate System – SEVAP was proposed in order to provide farmers and others with automatic estimations of the reference evapotranspiration. The methods of Penman-Monteith (FAO/56), Hargreaves, Jensen-Haise, Linacre, Makkink, Priestley & Taylor, Class A pan evaporation, and Thornthwaite were used in such a system. The SEVAP system was elaborated in Delphi computational language 5.0 version, and can be installed in a Pentium personnel computer with at least 150 MHz and 32 Mb RAM. It can run at Win 95 or higher and with Win NT. The efficiency of SEVAP system was evaluated with climatic data of Petrolina – PE, referring to 2002. Mean monthly data and daily data of maximum and minimum air temperature, relative humidity, insolation, wind velocity, Class A pan evaporation and solar radiation from March to August 2003 were used. Additionally, evapotranspiration assessments obtained by Penman-Monteith method accordingly with SEVAP and CROPWAT were compared and the determination coefficient obtained was equal to 0.96. The results show that the SEVAP system produce reliable and accurate evapotranspiration data in a monthly and daily scale. In the absence of insolation and wind velocity data the Penman-Monteith method can be substituted by with reasonable precision by Hargreaves' method.

SUMÁRIO

	página
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
RESUMO	
ABSTRACT	
1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Métodos de estimativa da evapotranspiração	21
3.1.1 Método de Penman-Monteith	21
3.1.2 Método de Hargreaves	26
3.1.3 Método de Jensen-Haise	27
3.1.4 Método de Linacre	27
3.1.5 Método de Makkink	28
3.1.6 Método de Priestley & Taylor	28
3.1.7 Método do Tanque Classe "A"	29
3.1.8 Método de Thornthwaite	30
3.2 Planejamento de irrigação	31
3.2.1 Lâmina de irrigação	31
3.2.2 Tempo de irrigação	32
3.2.3 Determinação do volume de água	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Aplicação do modelo SEVAP.	49
5. CONCLUSÕES	61
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

		página
Figura 1.	Tela principal do programa SEVAP	37
Figura 2.	Cadastro das estações meteorológicas em função das coordenadas geográficas.	37
Figura 3.	Caixa de diálogo de seleção das variáveis meteorológicas disponíveis para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith.	38
Figura 4.	Caixa de diálogo para inserção dos dados climatológicos pelo método de Penman-Monteith.	38
Figura 5.	Relatório da estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith.	39
Figura 6.	Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração pelo método de Hargreaves.	39
Figura 7.	Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração pelo método de Jensen-Haise	40
Figura 8.	Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração pelo método de Linacre	40
Figura 9.	Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração pelo método de Makkink.	41
Figura 10.	Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração pelo método de Priestley & Taylor.	41
Figura 11	Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração pelo método do Tanque "Classe A".	42
Figura 12	Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração pelo método de Thornthwaite.	42
Figura 13	Caixa de diálogo para utilização do recursos de Ajuda (Help) do SEVAP	43
Figura 14	Janela de seleção da estação meteorológica para visualização do gráfico.	43
Figura 15	Opção gráfica de apresentação da evapotranspiração	44

Figura 16	Caixa de diálogo para elaboração do balanço hídrico.	44
Figura 17	Relatório do balanço hídrico.	45
Figura 18	Classificação climática segundo Thornthwaite.	45
Figura 19	Algumas funções da opção Utilitários do SEVAP.	46
Figura 20	Cadastramento da área plantada.	46
Figura 21	Cadastramento da cultura implantada.	47
Figura 22	Caixa de diálogo para o planejamento da irrigação.	47
Figura 23	Relatório do planejamento da irrigação.	48
Figura 24	Informações sobre o módulo SEVAP.	48
Figura 25	Relacionamento entre os valores da evapotranspiração de referência calculados pelo CROPWAT e SEVAP, com dados de Campina Grande, PB.	50
Figura 26	Curso temporal da evapotranspiração de referência, durante o mês de janeiro de 2001, em Campina Grande, PB, calculada pelos softwares CROPWAT e SEVAP.	50
Figura 27	Comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração com base em dados mensais do ano de 2002.	52
Figura 28	Comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração com base em dados diários do mês de março de 2003.	53
Figura 29	Comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração com base em dados diários do mês de agosto de 2003.	53
Figura 30	Curso temporal da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, com opções variadas de cálculo, referente ao ano de 2002, em Petrolina, PE.	55
Figura 31	Curso temporal da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, com opções variadas de cálculo, referente ao mês de março de 2003, em Petrolina, PE.	56
Figura 32	Curso temporal da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, com opções variadas de cálculo, referente ao mês de agosto de 2003, em Petrolina, PE.	56

LISTA DE TABELAS

		página
Tabela.1	Valores de E_j quando a temperatura média do ar for igual ou superior a $26,5^{\circ}\text{C}$. Utilizada pelo método de Thornthwaite.	31
Tabela 2	Coefficientes de determinação entre os valores da evapotranspiração calculada pelo método de Penman-Monteith e demais métodos utilizados no estudo.	57
Tabela 3	Média e desvios-padrão (entre parênteses) das séries temporais anual de 2002 e dos meses de março e agosto de 2003 dos valores da evapotranspiração calculada pelos métodos utilizados no estudo.	59
Tabela 4	Coefficientes de determinação entre os valores da evapotranspiração calculada pelo método de Penman-Monteith (Op - 4) e demais opções	59
Tabela 5	Média e desvio-padrão das série temporais anual de 2002 e dos meses de março e agosto de 2003 dos valores da evapotranspiração calculada pela opções de 1 a 4 do método de Penman-Monteith.	60

1. INTRODUÇÃO

Os egípcios, há mais de 4.000 anos, já praticavam a irrigação por inundação na agricultura, embora de forma rudimentar. Atualmente, são utilizadas no manejo de várias culturas, técnicas modernas de irrigação, tais como: pivô central e gotejadores com pressão autocompensável, para manutenção de vazões constantes. No entanto, ainda persiste a questão: *quando e quanto se deve irrigar*. É evidente que o excesso de água aplicado à planta provoca problemas na aeração do solo e o déficit acarreta prejuízos, pela perda de água e insumos, energia e redução na produtividade.

O clima das regiões tropicais apresenta aspectos favoráveis ao plantio de diversas culturas, principalmente devido à disponibilidade energética, mas oferece restrições quanto à disponibilidade hídrica de origem pluvial, em várias regiões da Terra. Isso torna necessária a prática de irrigação, para garantir e otimizar a produção agrícola, desde que seja com base no

conhecimento das necessidades hídricas das culturas e no dimensionamento apropriado do manejo do sistema de irrigação (Silva, 2000).

Na elaboração e operacionalização de um projeto de irrigação, um dos fatores de maior importância é a quantificação precisa do volume de água necessário ao desenvolvimento adequado das culturas implantadas. Procura-se identificar o momento preciso de irrigar, o sistema de irrigação a ser empregado e a lâmina de água a ser aplicada, de forma que atenda satisfatoriamente às necessidades hídricas das plantas e proporcione maior viabilidade econômica da exploração agrícola. A agricultura irrigada se apresenta, atualmente, como uma grande alternativa econômica para o Brasil, particularmente para a região Nordeste. Assim, é necessário que os recursos hídricos disponíveis sejam usados de forma racional, através da utilização de técnicas apropriadas de manejo da água, do solo e de cultivos.

O uso eficiente da água na agricultura irrigada é essencial, face à escassez dos recursos hídricos e ao elevado custo dos insumos, o que torna imperativo a utilização de uma metodologia apropriada para o planejamento e administração da irrigação. Por essa razão, fica cada vez mais evidenciada a necessidade da combinação correta dos diversos fatores que possibilite a determinação do volume de água a ser aplicado ao solo em cada irrigação (Moreira, 1993).

O sistema de irrigação por gotejamento é conhecido há muito tempo para cultivos em casa-de-vegetação, entretanto, somente recentemente esse método tem sido empregado em campo (Withers & Vipond, 1988). Esse sistema oferece grandes vantagens frente às irrigações por superfície ou por aspersão, devido a evaporação do solo ser reduzida, a percolação praticamente eliminada e, também, ao excelente controle de aplicação da água, possibilitando, inclusive, a prática da fertirrigação. Além disso, devido ao alto custo de manutenção desse sistema, ele é geralmente utilizado em culturas consideradas nobres, de alto valor comercial,

como as frutíferas. Por outro lado, de acordo com Bernardo (1986), como o sistema por gotejamento não inunda toda a área irrigada, tem-se que, no cálculo da evapotranspiração média na área do projeto, considerar a percentagem da área molhada.

No Brasil, a oferta de produtos classificados como tecnologia de informática, concebidos para aplicação em agrometeorologia, é muito limitada. Ao mesmo tempo em que a agricultura nacional amplia a sua participação no mercado internacional, ainda se verifica que grande número de agricultores usa de forma limitada importantes conhecimentos gerados na agrometeorologia nacional. Dentre os quais, destaca-se o coeficiente de cultivo de diversas frutíferas, que estão tendo suas necessidades hídricas determinadas em condições edafoclimáticas do Nordeste brasileiro. Nesse sentido, há grande lacuna a ser preenchida no tema desenvolvimento de "softwares" que facilitem a utilização desses conhecimentos gerados, por parte dos irrigantes e formuladores de políticas destinadas à sustentabilidade da agricultura nacional.

Alguns desses "softwares" como: AZSCHED (Fox Jr. *et al.*, 1992), CROPWAT (FAO, 1993) e CRIWAR (Boss, 1996), dentre outros, são utilizados no manejo da irrigação. Entretanto, como são disponibilizados em "ambiente MS-DOS", eles apresentam várias limitações, quando utilizados com propósitos práticos, face a limitação operacional desse ambiente. A necessidade de implementação de novas estratégias de manejo de água às culturas, evidencia a demanda de modelos em linguagem computacional simples e acessível aos potenciais usuários da irrigação. A automação é uma ferramenta que contribui, sobremaneira, na tomada de decisão da programação das irrigações em condições de campo, em tempo quase que real, estimulando, assim, o uso de microcomputadores e "softwares" no dimensionamento da reposição da água perdida pelas plantas no processo de evapotranspiração (Gomide, 1998).

Considerando que a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada no Brasil não utiliza qualquer tipo de estratégia de uso e manejo racional da água na irrigação e o monitoramento automático ainda é muito incipiente, o presente trabalho propõe uma contribuição à otimização dos recursos hídricos destinados ao manejo da irrigação. Nesse contexto, o objetivo principal desta pesquisa é a elaboração de um programa computacional para determinação de evapotranspiração de referência através de diversos métodos de estimativa. São incluídos, ainda, o balanço hídrico climático, bem como a identificação do volume e tempo de aplicação de água em frutíferas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conhecimento do consumo hídrico das culturas, obtido com base na estimativa da evapotranspiração, constitui-se numa informação preciosa no manejo da água em qualquer região do planeta, principalmente neste momento que ocorre forte conscientização popular do uso racional dos recursos hídricos. Na literatura especializada são encontradas diversas metodologias que propiciam a estimativa do consumo hídrico de culturas. Entretanto, sua utilização prática é bastante limitada em face a ausência de sistemas apropriados que viabilizem a estimativa da evapotranspiração, de forma simples e confiável, de acordo com a disponibilidade dos parâmetros relacionados com a planta, solo e atmosfera.

O planejamento e o manejo adequado dos recursos hídricos pressupõe o conhecimento das reais necessidades hídricas das culturas, que podem ser traduzidas através de coeficientes de cultivos, e a existência de uma rede de estações meteorológicas (automáticas ou não). Uma vez escolhido o sistema de irrigação mais apropriado, o irrigante teria reunido as condições

necessárias para o manejo sustentável dos recursos hídricos de que dispõe. No entanto, ele pode se deparar com dificuldades associadas à coleta de dados climáticos, cálculo da lâmina de água evapotranspirada por seus cultivos, etc. Assim, a utilização de um “software” destinado a essas tarefas, em ambiente que facilite a interação do usuário com o computador, e que efetivamente racionalize a prática da irrigação, deve ser incentivada e disseminada entre os usuários da agricultura irrigada.

Segundo Doorenbos e Pruitt (1977), dentre os mais diversos métodos para se estimar a evapotranspiração, a escolha do método está condicionada a precisão dos dados climáticos medidos durante alguns anos. Numa avaliação das equações mais comuns para a determinação da evapotranspiração feita pela American Association of Civil Engineers, na qual foram usados dados obtidos em 10 diferentes locais do mundo, concluiu-se que não existe um método, que utilize dados climáticos, que possa ser universalmente adequado em todos os tipos de climas, principalmente em regiões tropicais e de altas altitudes e que dispense algum tipo de calibração local ou regional.

As variáveis hídricas do solo, as características da planta, a profundidade efetiva das raízes e os fatores atmosféricos são elementos essenciais na estimativa da evapotranspiração e no planejamento da irrigação. A planta necessita de uma quantidade de água adequada, aplicada com frequência, determinada por fatores do solo, clima e da própria cultura (Klar, 1991).

O estudo das perdas hídricas torna-se cada vez mais relevante, sobretudo no momento em que a humanidade reconhece na água potável o bem mais precioso no novo milênio. Em solos vegetados e reservatórios de água doce, respectivamente, a evapotranspiração e a evaporação representam uma demanda considerável de água, justificando-se todos os esforços para quantificá-la e tentar minimizá-la. A quantificação precisa da evapotranspiração é extremamente importante, pois em projetos de irrigação, conhecendo-se a perda de água, é

possível determinar o momento certo da irrigação. Por outro lado, a transferência do vapor d'água para atmosfera originada das superfícies vegetadas, quando considerados apenas aspectos climatológicos, como no caso da evapotranspiração de referência, também é essencial no manejo de culturas irrigadas.

Por mais de uma década foi adotado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) o conceito e a forma de cálculo da evapotranspiração de referência proposta por Doorenbos & Pruitt (1977). Allen *et al.* (1989), comparando a evapotranspiração de referência obtida pelos métodos de Penman, Kimberly-Penman, Penman corrigido e Penman-Monteith com medições lisimétricas, observaram que o modelo de Penman-Monteith foi o que melhor se ajustou às medições diárias e mensais. Concluíram que a alfafa se ajusta melhor que a grama como cultura padrão na determinação da evapotranspiração de referência, visto que sua altura e rugosidade se aproximam da maioria das culturas agrícolas. A calibração da equação de Penman provocou vários problemas na definição da cultura de referência. Alguns pesquisadores argumentaram que as variedades de grama e suas características morfológicas não são padronizadas para diferentes condições climáticas e a alfafa apresenta problemas de variedade e manejo (Allen *et al.*, 1994a).

Reconhecendo a necessidade de adoção de um único método para representar e definir a evapotranspiração de referência, em 1990 a FAO e a ICID (*International Commission on Irrigation and Drainage*) reuniram uma comissão de especialistas para redefinir o conceito e apresentar uma nova metodologia de cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0). Como resultado das discussões, foram introduzidos, na formulação anterior, os valores de 70 sm^{-1} , 23% e 12 cm para a resistência estomática, albedo e altura de uma cultura hipotética, respectivamente. Nesse sentido, como o estabelecimento das características dessa cultura, que se aproxima à da grama, adotaram o método de Penman-Monteith como o mais adequado para determinar ET_0 . Segundo Allen *et al.* (1994b) essa cultura foi escolhida porque suas

características são melhor definidas, facilmente adaptadas e disponível para validação de novos modelos. Em se tratando de informações importantes versando sobre a ET_0 , há inúmeros estudos na literatura que fazem a comparação entre diferentes métodos de estimativa e o modelo padrão da FAO. Alguns estudos mais relevante são apresentados a seguir.

Chiew *et al.* (1995) determinaram a evapotranspiração de referência usando dados de 16 estações climatológicas da Austrália, utilizando os métodos de Doorenbos & Pruitt (1977) e de Penman-Monteith. Eles observaram que o método de Doorenbos & Pruitt (1977) sobrestima, em 20-40%, a evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith.

Ortega-Farias *et al.* (1995) verificaram que a evapotranspiração de referência obtida com base no balanço de energia subestima os valores obtidos pelo método de Penman-Monteith. Michalopoulou & Papaioannou (1991) determinaram ET_0 para 31 localidades da Grécia com base nos métodos de Penman, Priestley-Taylor e Thornthwaite e verificaram que, para determinações mensais, os modelos de Priestley-Taylor e Thornthwaite sempre subestimam os valores previstos pelo método de Penman-Monteith.

Smith *et al.* (1996), revisando a metodologia de determinação das necessidades hídricas de culturas, proposta pela FAO, reconheceram a equação de Penman-Monteith como método padrão na determinação da evapotranspiração de referência e de culturas. Além disso, que a mudança na definição de evapotranspiração de referência, proposta por Allen *et al.* (1994a) para uma cultura hipotética com parâmetros fixos, facilita a calibração do coeficiente de cultura na utilização do manejo da irrigação.

Jensen *et al.* (1997) calcularam a evapotranspiração de referência em diferentes condições climáticas, com base em vários métodos de determinação, objetivando verificar se o método proposto pela FAO pode ser simplificado sem perda de precisão. Nesse estudo,

observaram pequenas diferenças quando utilizaram a temperatura de ponto de orvalho ao invés da temperatura mínima média e que esse procedimento elimina a necessidade de medição da umidade relativa.

Sentelhas (1998) avaliou os efeitos da utilização de dados meteorológicos obtidos em estações convencional e automática na estimativa diária da evapotranspiração de referência, pelos métodos de Penman, Priestley-Taylor e Penman-Monteith (Padrão FAO), em Piracicaba, SP. As melhores estimativas da evapotranspiração foram obtidas a partir dos dados da estação automática, por qualquer método. E, ainda, que o método de Penman-Monteith foi o que apresentou os melhores resultados no cálculo da evapotranspiração, considerando-se o período integral da análise e que o método de Priestley-Taylor apresentou resultados semelhantes.

Silva *et al.* (2001) realizaram a estimativa da evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman-Monteith - FAO/56, Hargreaves e Tanque "Classe A" com dados da estação climatológica de Campina Grande, PB. Foram utilizados os dados das temperaturas máxima e mínima do ar, insolação e velocidade do vento. Desse estudo, eles concluíram que a evapotranspiração obtida pelo método de Penman-Monteith superestima os valores obtidos pelo método de Hargreaves em períodos mensais e semanais. Na ausência de variáveis climatológicas necessárias para a aplicação do modelo da FAO, a equação de Hargreaves pode ser utilizada com precisão na estimativa da evapotranspiração de referência. Concluíram, ainda, que a estimativa da evapotranspiração com base no Tanque "Classe A" deve ser realizada com cautela.

Silva *et al.* (2002) desenvolveram programa computacional de estimativa da evapotranspiração de referência diária, com base no método de Penman-Monteith (FAO/56). Esse "software" foi desenvolvido em linguagem computacional *Delphi*, que validado com os valores de evapotranspiração obtidos com o modelo da FAO (CROPWAT) apresentou

estimativas semelhantes. Também nessa linha de pesquisa, Naoum e Tsanis (2003) apresentaram “software” de estimativa da evapotranspiração com base nos métodos de Penman-Monteith e do Tanque “Classe A”. Segundo os autores, o modelo proposto oferece melhor entendimento da variabilidade espacial da evapotranspiração e que o método do Tanque “Classe A” oferece estimativas menores do que o de Penman-Monteith.

Muito embora exista uma quantidade razoável de estudos versando sobre a evapotranspiração, o desenvolvimento de novas variedades modificadas geneticamente, ou por técnicas clássicas, a ciência requer a atualização contínua desse importante tema na área ambiental. Além disso, muito há de ser feito para que a prática da irrigação ocorra de forma sustentável. O desenvolvimento de tecnologias de informática, aliadas a estudos agrometeorológicos, representa uma contribuição importante para que, efetivamente, ocorra a sustentabilidade dos recursos hídricos de qualquer região.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O programa computacional proposto na presente pesquisa, aqui denominado **SISTEMA DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO (SEVAP)** foi desenvolvido em linguagem computacional *Delphi* e em ambiente *Windows*. Ele pode ser instalado e operado em microcomputadores *Pentium*, com no mínimo 150 MHz e 32 MB RAM, em ambientes Win 95, ou superior, e Win NT. De acordo com os dados disponíveis e com o grau de precisão desejado, a evapotranspiração poderá ser obtida via SEVAP com base nos seguintes métodos de estimativa: Penman-Monteith (FAO/56), Hargreaves, Jensen-Haise, Linacre, Makkink, Priestley & Taylor, Tanque “Classe A” e Thornthwaite.

Através do SEVAP, o usuário poderá selecionar as opções de monitorar estações meteorológicas ou experimentos agrometeorológicos, consultar simplesmente o valor da evapotranspiração ou de qualquer outra variável envolvida no cálculo. Na opção *Utilitário*,

ainda, é possível a obtenção de classificação climática, balanço hídrico e realizar planejamento de irrigação, dentre outras funções específicas do sistema.

No cálculo da evapotranspiração pelo modelo de Penman-Monteith foram utilizadas as parametrizações apresentadas no Boletim 56 da FAO para determinação das variáveis climatológicas não-disponíveis em observações de rotina em estações meteorológicas convencionais. Assim, visando comparar os valores da evapotranspiração, pelo método de Penman-Monteith, obtidos pelo modelo SEVAP e pelo “Software” CROPWAT apresentado pela FAO, foram utilizados os dados da estação climatológica principal da Embrapa Algodão (latitude: 7°13’S, longitude: 35°52’ W e altitude: 548 m), Campina Grande, PB, referentes ao mês de janeiro de 2001. Os dados utilizados foram os seguintes: insolação diária, temperaturas máxima e mínima do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar, assim como, as coordenadas locais (latitude, longitude e altitude). Por outro lado, o modelo SEVAP foi também utilizado para a estimativa da evapotranspiração com base nos oito métodos apresentados nesse estudo. Nessas estimativas foram utilizados os dados climatológicos do ano de 2002 da estação climatológica de Petrolina, PE (latitude: 9°9’ S, longitude: 40°22’ W e altitude: 365,5 m), pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa-Semi-Árido). Na estimativa da evapotranspiração foram utilizados os dados médios mensais do ano de 2002 e os valores diários dos meses de março e agosto do ano de 2003, das seguintes variáveis climatológicas: temperaturas máxima e mínima do ar, umidade relativa, insolação, velocidade do vento, evaporação do Tanque “Classe A” e radiação solar global.

3.1. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

3.1.1. Método de Penman-Monteith

Na estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith considera-se a resistência estomática de 70 sm^{-1} e a altura da cultura hipotética fixada em $0,12\text{m}$, pela equação (Allen *et al.*, 1994a):

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900 U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

em que ET_0 (mmdia^{-1}) R_n (saldo de radiação) e G (densidade do fluxo de calor no solo) são expressas em $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$, Δ é a declinação da curva de saturação do vapor da água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) e U_2 é a velocidade do vento (média diária) a 2m acima da superfície do solo (ms^{-1}), T a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), e_s é pressão de saturação do vapor (kPa), e_a é pressão real do vapor (kPa) e γ é o fator psicométrico (MJkg^{-1}).

A seguir é apresentado o procedimento de cálculo de todas as variáveis da equação (1), de acordo com o Boletim 56/FAO (Allen *et al.*, 1998), para obtenção da evapotranspiração de referência, com base em dados climatológicos, tais como: temperaturas máxima e mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento.

a) Δ (declinação da curva de saturação do vapor da água)

$$\Delta = \frac{2504 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (2)$$

em que:

T é a temperatura média do ar, obtida por:

$$T = \frac{T_x + T_i}{2} \quad (3)$$

T_x - temperatura máxima em $^\circ\text{C}$

T_i - temperatura mínima em °C

T - em °C

Δ - em $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$

b) $e^0(T_x)$ (pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima)

$$e^0(T_x) = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_x}{T_x + 237,3}\right) \quad (4)$$

em que:

T_x - temperatura máxima em °C

$e^0(T_x)$ – expressa em kPa

c) $e^0(T_i)$ (pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima)

$$e^0(T_i) = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_i}{T_i + 237,3}\right) \quad (5)$$

em que:

T_i - temperatura mínima em °C

$e^0(T_i)$ – expressa em kPa

d) e_a (pressão real do vapor)

$$e_a = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_d}{T_d + 237,3}\right)$$

(6)

em que:

T_d - temperatura ponto de orvalho em °C

e_a – expressa em kPa

e) e_s (pressão de saturação do vapor)

$$e_s = \frac{e^0(T_x) + e^0(T_i)}{2} \quad (7)$$

em que:

$e^0(T_x)$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima, expressa em kPa

$e^0(T_i)$ – pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima, expressa em kPa

e_s – pressão de saturação do vapor, expressa em kPa

f) $e_s - e_a$ (déficit da pressão de saturação do vapor)

$$(e_s - e_a) = \frac{e^0(T_x) + e^0(T_i)}{2} - e_a \quad (8)$$

em que:

e_s – pressão de saturação do vapor, expressa em kPa

$e_s - e_a$ - expressa em kPa

g) U_2 (velocidade do vento a 2 metros de altura)

$$U_2 = U_z \frac{4,87}{\ln(67,8Z - 5,42)} \quad (9)$$

em que:

U_z (ms^{-1}) - velocidade do vento a altura Z

Z (metros) - altura de medida da velocidade do vento

U_2 (ms^{-1}) - velocidade do vento a 2 metros de altura

h) R_n (saldo de radiação)

$$R_n = 0,77(0,25 + 0,50 \frac{n}{N})R_a - 2,45 \cdot 10^{-9} (0,9 \frac{n}{N} + 0,1)(0,34 - 0,14\sqrt{e_a})(T_x^4 + T_i^4) \quad (10)$$

em que:

n – insolação observada, em horas

N – duração máxima teórica do dia, em horas

R_a – radiação extraterrestre, em $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$

e_a - pressão real do vapor, em kPa

T_x e T_i - temperaturas máxima e mínima, em graus Kelvin

i) R_a (radiação extraterrestre)

$$R_a = 37,6d_r(\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (11)$$

em que:

d_r - distância relativa Terra-Sol

ϕ - latitude, em graus

δ - declinação do sol, em graus

ω_s - ângulo horário correspondente ao nascer do Sol, em radiano

R_a - expressa em $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$

j) γ (fator psicrométrico)

$$\gamma = 0,00163 \frac{P}{\lambda} \quad (12)$$

em que:

P - expresso em kPa

λ - expresso em MJkg^{-1}

l) λ (calor latente de vaporização da água)

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \cdot 10^{-3})T \quad (13)$$

em que:

T - temperatura do ar em °C

λ - expresso em MJkg^{-1}

m) P (pressão atmosférica)

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065Z}{293} \right)^{5,26} \quad (14)$$

em que:

Z - altitude em metros

P - expressa em kPa

n) δ (declinação do sol)

$$\delta = 0,409 \text{ sen}(0,0172J - 1,39) \quad (15)$$

em que:

δ - expresso em graus

J - dia Juliano

o) ω_s (horário correspondente ao movimento do sol)

$$\omega_s = \arccos(-t g \phi t g \delta) \quad (16)$$

em que:

ω_s - expresso em radianos

ϕ - latitude, em graus

δ - declinação, em graus

p) d_r (distância relativa Terra-Sol)

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(0,0172J) \quad (17)$$

em que:

J - número do dia no ano (calendário Juliano)

q) N (insolação máxima teórica)

$$N = 7,64 \omega_s \quad (18)$$

em que:

ω_s - ângulo solar (radianos)

N - insolação máxima teórica (horas).

r) G (Fluxo de calor no solo)

De acordo com Allen *et al.* (1998) a magnitude do fluxo de calor no solo em períodos diários é relativamente baixa e pode ser desprezada ($G \cong 0$).

3.1.2. Método de Hargreaves

Na ausência dos dados de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, a evapotranspiração, em mm/dia, pode ser estimada através da seguinte equação (Hargreaves, 1974):

$$ET_0 = 0,0023(T_{med} + 17,8)(T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \quad (19)$$

em que T_{med} , T_{max} e T_{min} , em $^{\circ}C$, representam, respectivamente, as temperaturas média, máxima e mínima e R_a é a radiação extraterrestre (mm/dia).

3.1.3. Método de Jensen-Haise

Para regiões áridas e semi-áridas, Jensen-Haise (1963) apresentaram a seguinte equação para o cálculo da evapotranspiração de referência:

$$ET_0 = R_s (0,025T_a + 0,08) \quad (20)$$

em que T_a é a temperatura média diária ($^{\circ}C$); R_s é a radiação solar global convertida em unidades de água evaporada (mm) e ET_0 a evapotranspiração de referência, em mm/dia.

3.1.4. Método de Linacre

A evapotranspiração de referência pelo método de Linacre, em mm/dia, pode ser obtida em função da altitude, latitude e das temperaturas diárias máxima, mínima e do ponto de orvalho, através da equação (Linacre, 1977):

$$ET_0 = \frac{700 T_m / (100 - \phi) + 15 (T_a - T_d)}{(80 - T_a)} \quad (21)$$

em que $T_m = T_a + 0,006z$, z é a altitude (m); T_a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); ϕ a latitude local (graus) e T_d a temperatura média do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$).

3.1.5. Método de Makkink

A equação para estimativa da evapotranspiração de referência a partir da medição da radiação solar foi também proposta por Makkink (1957):

$$ET_0 = R_s \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) + 0,12 \quad (22)$$

em que R_s é a radiação solar convertida em unidades de água evaporada; Δ a declinação da curva de saturação da pressão de vapor de água ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ o fator psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

De acordo com Rosenberg *et al.* (1983) a fórmula de Makkink apresenta bons resultados em climas úmidos, entretanto em regiões áridas não apresenta resultados satisfatórios.

3.1.6. Método de Priestley & Taylor

O método de Priestley & Taylor (1972), utilizado na estimativa da evapotranspiração, constitui-se numa aproximação do método de Penman. Nesta equação permanece apenas o saldo de radiação corrigido por um coeficiente empírico (α), conhecido como parâmetro de Priestley & Taylor, o qual incorpora a energia adicional ao processo de evapotranspiração proveniente do termo aerodinâmico. Eles mostraram que esse coeficiente varia de 1,08 a 1,34.

com média de 1,26 em condições mínimas de advecção regional. Através do método de Priestley & Taylor, a evapotranspiração, em $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$, pode ser obtida pela equação:

$$ET_0 = \frac{\alpha W (R_n - G)}{\lambda} \quad (23)$$

em que (α) é o parâmetro de Priestley & Taylor; R_n o saldo de radiação ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$); G o fluxo diário de calor no solo ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$); λ o calor latente de evaporação de água ($2,45 \text{ MJ Kg}^{-1}$) e W o fator de ponderação, que varia em função da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e do fator psicrométrico, que pode ser estimado por (Viswanadham *et al.*, 1991):

$$W = 0,407 + 0,0147 T \quad (24)$$

$$\text{para } 0 < T < 16^{\circ}\text{C}$$

$$W = 0,483 + 0,01 T \quad (25)$$

$$\text{para } 16,1 < T < 32^{\circ}\text{C}$$

3.1.7. Método do Tanque "Classe A"

A evapotranspiração de referência pelo método do Tanque "Classe A" pode ser obtida, de forma bastante simplificada, a partir da evaporação observada no tanque Classe "A", através da seguinte expressão (Doorenbos & Pruitt, 1977):

$$ET_0 = K_p E_v \quad (26)$$

em que ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm/dia); K_p é o coeficiente de conversão da evaporação do tanque Classe “A” em evapotranspiração de referência, que varia em função da velocidade do vento, da área de exposição vegetal relativa ao tanque e da umidade relativa do ar e E_v é a lâmina de evaporação do tanque Classe “A”(mm/dia).

3.1.8. Método de Thornthwaite

O método de Thornthwaite é a fórmula mais antiga de se estimar a evapotranspiração. Baseia-se na temperatura média mensal e na duração efetiva do dia e não é apropriado para estimativas da evapotranspiração em curtos períodos de tempo, como semanas ou dias. Trata-se de um método climatológico para estimativa da evapotranspiração potencial mensal (mm/mês) que pode ser obtido da seguinte forma (Thornthwaite, 1948):

$$ET_p = C_j E_j = 0,533 C_j \left(\frac{10 \bar{T}_a}{I} \right)^{0,718} \quad (27)$$

em que C_j é o fator de correção, que varia em função do número de dias do mês considerado (D_j) e da insolação máxima teórica (N_j), obtidos, respectivamente, por:

$$C_j = D_j \frac{N_j}{12} \quad (28)$$

$$N_j = \text{arc cos} \left(\frac{-\text{tg} \phi \text{ tg} \delta}{15} \right) \quad (29)$$

em que ϕ é a latitude local; δ a declinação do Sol para o dia considerado, obtida através da

equação 15, a insolação máxima teórica (N_j) é calculada para o dia 15 de cada mês (j); T_a é a temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$) e a_i é função cúbica do índice anual de calor, dada por:

$$a_i = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49 \quad (30)$$

em que I é o índice de calor obtido pela soma dos 12 índices mensal (i), expressos por:

$$i = \left(\frac{T_a}{5} \right)^{1,514} \quad (31)$$

A Equação (27) somente é válida quando a temperatura média do ar for inferior a $26,5^{\circ}\text{C}$. Para as temperaturas superiores a esses valor, ET_p torna-se independente de I , devendo ser usado o valor correspondente a Tabela 1.

Tabela 1. Valores de E_j quando a temperatura média do ar for igual ou superior a $26,5^{\circ}\text{C}$

T ($^{\circ}\text{C}$)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
26						4,5	4,5	4,6	4,6	4,6
27	4,6	4,7	4,7	4,7	4,8	4,8	4,8	4,8	4,6	4,6
28	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	5,1	5,1	5,1	5,1	5,2
29	5,2	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,4	5,4
30	5,4	5,4	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,6	5,6
31	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,8
32	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,9	5,9	5,9	5,9
33	5,9	5,9	5,9	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
34	6,0	6,0	6,0	6,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
35	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
36	6,1	6,1	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
37	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2

3.2. Planejamento da irrigação

3.2.1. Lâmina de irrigação

A lâmina de irrigação diária (mm), considerada constante para cada semana, será obtida pela relação entre o volume de água aplicado por planta e a área de molhamento provocado pelo sistema de irrigação, ou seja:

$$LA = \frac{V_a}{Am} \quad (32)$$

em que LA é a lâmina de irrigação (mm), V_a é o volume de água aplicado à planta (litros), de acordo com o método de estimativa da evapotranspiração, e Am é a área de molhamento (m^2).

3.2.2. Tempo de irrigação

O tempo necessário para aplicar cada lâmina de irrigação será determinado da seguinte forma:

$$Ti = \frac{V_a}{n.q} \quad (33)$$

em que Ti é o tempo de irrigação (hora, minuto), V_a é o volume de água aplicado à cultura (litros), n é o número de gotejadores e q é a vazão dos gotejadores.

3.2.3. Determinação do volume de água

O volume de água (V_a), em litros, aplicado por planta, com base em um dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, foi obtido pela relação (Bernardo, 1986):

$$V_a = \frac{ET_0 \cdot K_c \cdot A_p \cdot TR \cdot P}{E_f \cdot 100} \quad (34)$$

em que ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm/dia), K_c é o coeficiente de cultura, A_p é a área máxima ocupada pela planta (m^2), TR é o turno de rega (dias), P é a percentagem de área molhada (%) e E_f é a eficiência do sistema de irrigação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas telas do programa Sistema de Estimativa da Evapotranspiração (SEVAP) são apresentadas nas Figuras de 1 a 24. A Figura 1 apresenta a visão geral do programa, com a barra de menu principal, localizada no topo da tela, que indica as principais funções do “software”: *Métodos*, *Estação*, *Consulta*, *Utilitários*, *Informações* e *Sair*. O cadastro das estações meteorológicas ou experimento agrometeorológico, em função das coordenadas geográficas, pode ser efetuado conforme exibido na Figura 2. Nela, o usuário cria um código com cinco dígitos e, ainda, tem as opções de cancelar, remover e gravar a estação meteorológica desejada. Após o cadastramento da estação meteorológica, o usuário seleciona o método de estimativa que deseja usar no cálculo da evapotranspiração (Figura 1) e executa as ações descritas como seguem.

Caso seja selecionado o método de Penman-Monteith, será apresentada a caixa de diálogo “Dados Climatológicos Disponíveis” (Figura 3), que oferece ao usuário a opção de

cálculo da evapotranspiração de acordo com os dados disponíveis e precisão desejada, que está associada à disponibilidade de dados. As opções variam desde a mais simples - opção 1 - (temperaturas máxima e mínima, umidade relativa, insolação e velocidade de vento) até as mais precisas, que não utilizam a parametrização da radiação global (opção 4) nem do saldo de radiação (opção 5). A Figura 4 exibe a caixa de diálogo para opção 1, onde os dados de entrada ali colocados são totalmente arbitrários, bem como em todas as telas do programa apresentadas no trabalho, exceto os valores das coordenadas geográficas. Como mencionado anteriormente, é necessário cadastrar previamente a estação climatológica ou o experimento agrometeorológico, com código, nome e as coordenadas geográficas. A saída de dados para visualização e impressão é obtida clicando em *Relatório* e sua saída é exibida na Figura 5.

A Figura 6 exibe a *Caixa de diálogo* para estimativa da evapotranspiração pelo método de Hargreaves. Os dados de entrada são apenas as temperaturas máxima e mínima do ar e a data do cálculo, desde que as coordenadas geográficas tenham sido registradas anteriormente. Os botões *Inserir*, *Alterar*, *Remover*, *Ajuda*, *Relatório* e *Voltar* desse método, bem como dos demais, têm as suas funções bastantes especificadas, como sugerem seus próprios nomes.

A Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração pelo método de Jensen-Haise é apresentada na Figura 7, pelo método de Linacre na Figura 8, pelo método de Makkink na Figura 9, pelo método de Priestley & Taylor na Figura 10, pelo método do Tanque “Classe A” na Figura 11 e pelo método de Thornthwaite na Figura 12. Os dados necessários para a execução desses métodos são claramente explícitos nas caixas de diálogos. As demais funções, tais como *Alterar*, *Inserir*, *remover*, *Ajuda*, *Relatório* e *Sair*, já foram comentadas anteriormente.

Na Figura 13 são apresentados os principais detalhes da opção *Ajuda* do programa computacional SEVAP. Esse recurso tem as mesmas funções de qualquer “Software”

compatível com o ambiente “Windows”. A tela de seleção da estação meteorológica para visualização do gráfico da evapotranspiração é apresentada na Figura 14. A apresentação gráfica da evapotranspiração por todos os métodos de estimativa encontra-se na Figura 15.

Na barra do menu principal aciona-se o botão *Utilitário* para acessar a Caixa de diálogo para elaboração do balanço hídrico, segundo Thornthwaite (1948), conforme é apresentado na Figura 16. Nessa tela há as opções clássicas do programa SEVAP, e mais ainda a possibilidade de se visualizar o relatório do balanço hídrico (Figura 17) e a classificação climática segundo Thornthwaite (Figura 18). Ainda em *Utilitários* é possível realizar o planejamento de irrigação (Figura 19). Para tanto, é necessário o cadastramento da área de cultivo (Figura 20), com informações específicas sobre a irrigação utilizada e cultura implantada (Figura 21), com informações sobre o coeficiente de cultivo em cada fase do ciclo produtivo.

O planejamento da irrigação é realizado com a seleção do método para estimativa da evapotranspiração de referência, que pode ser: Penman-Monteith, Hargreaves e Tanque “Classe A”. A caixa de diálogo para o planejamento da irrigação, utilizando-se o método de Penman-Monteith, é apresentada na Figura 22; enquanto o relatório correspondente é apresentado na Figura 23. Finalmente, na Figura 24 são apresentadas as informações sobre o módulo SEVAP.



Figura 1. Tela principal do programa SEVAP.

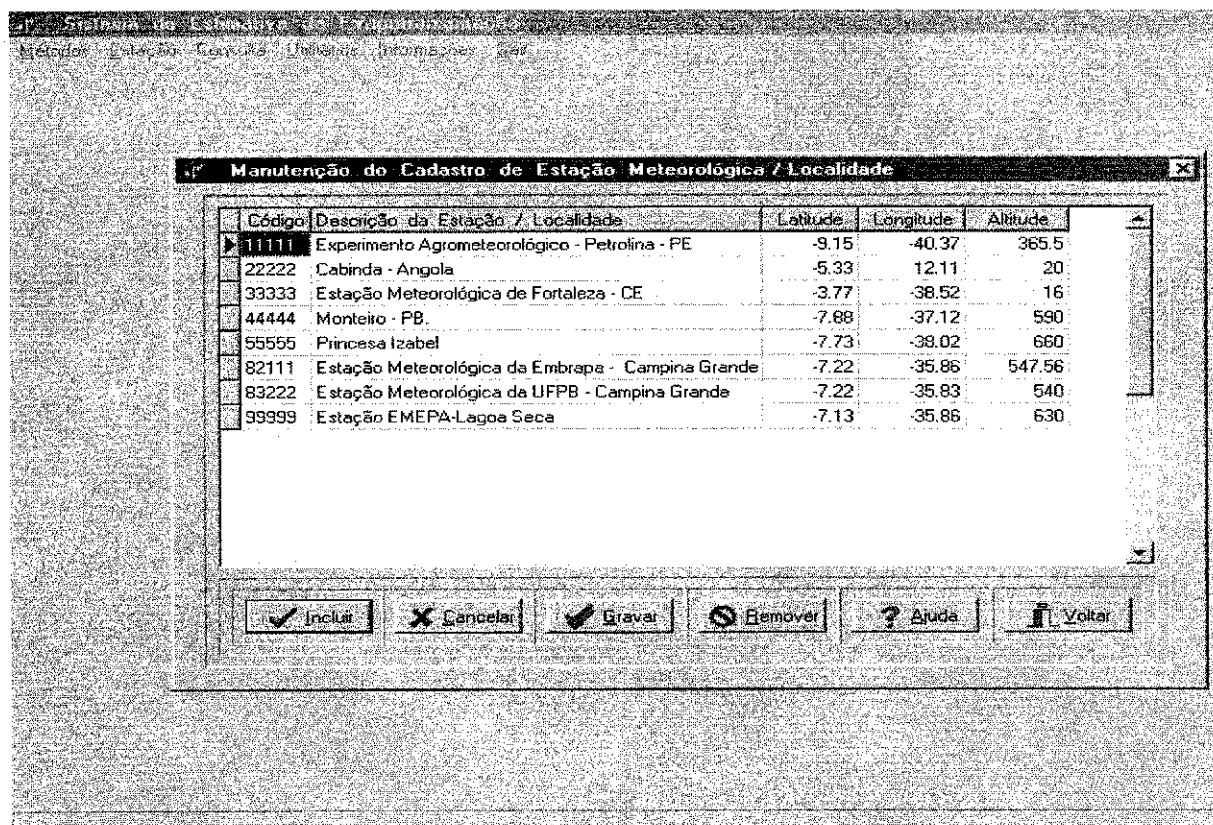


Figura 2. Cadastro das estações meteorológicas em função das coordenadas geográficas.

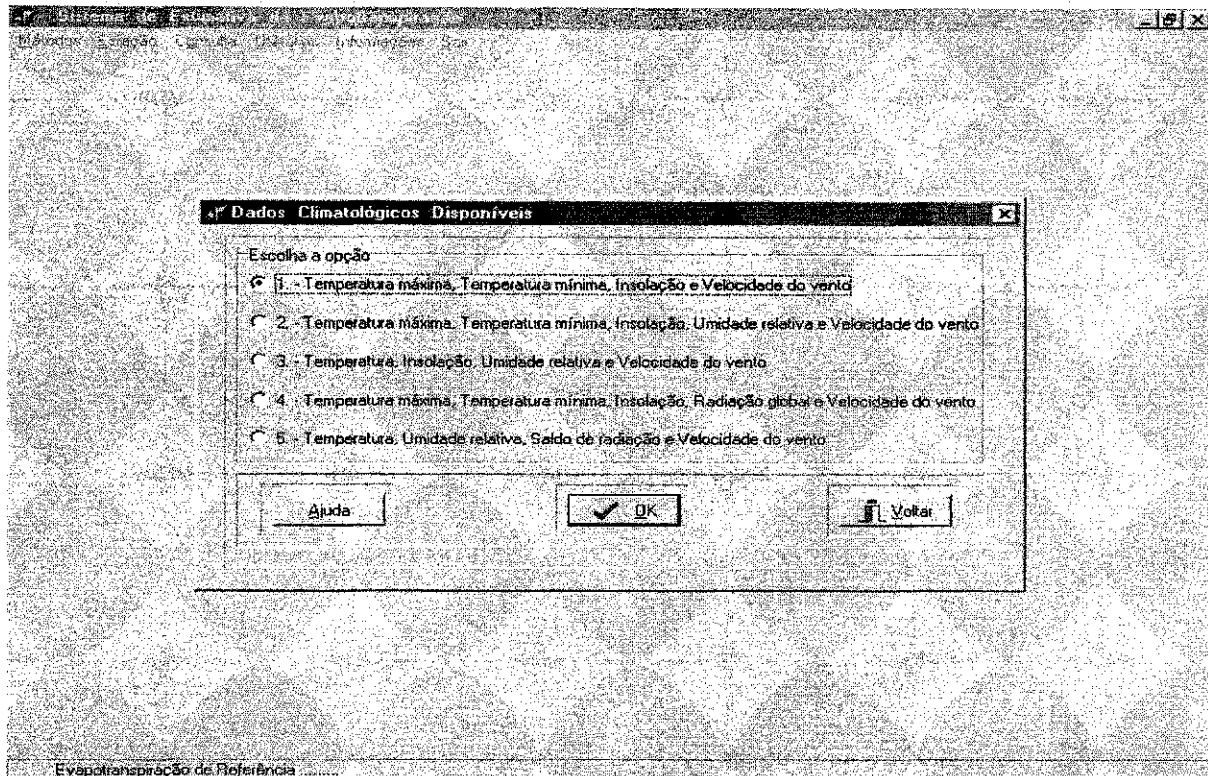


Figura 3. Caixa de diálogo de seleção das variáveis meteorológicas disponíveis para o cálculo da evapotranspiração de referência.

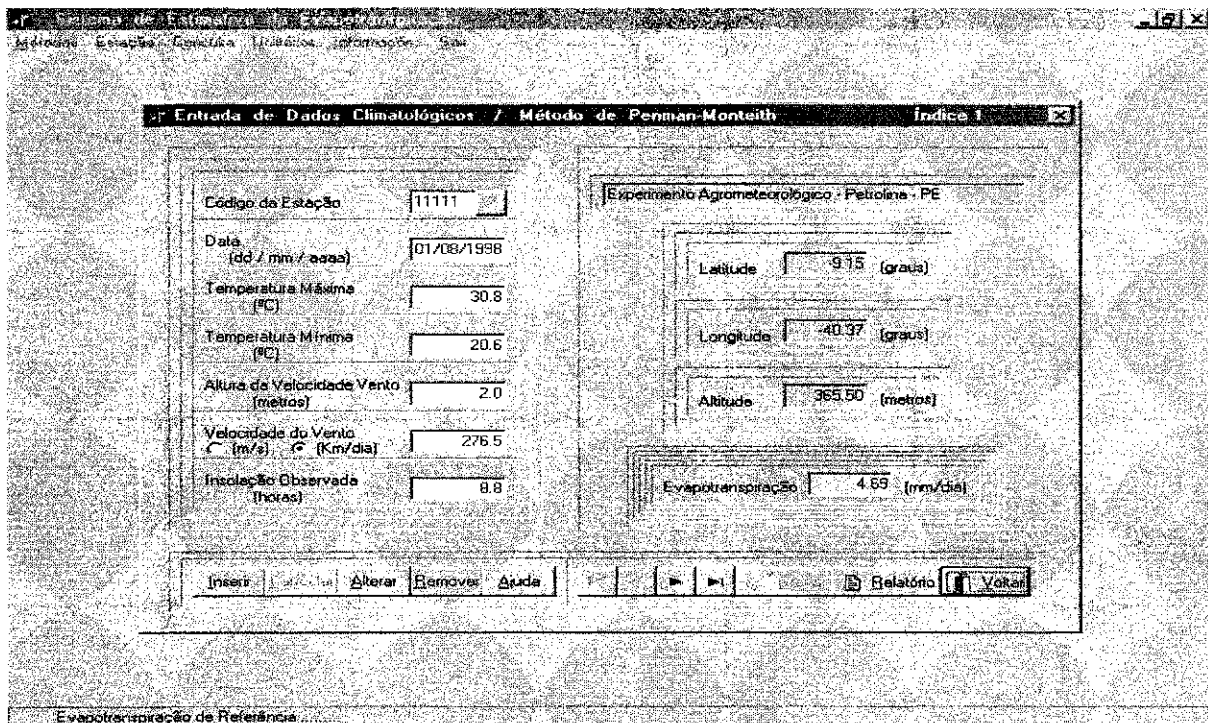


Figura 4. Caixa de diálogo para inserção dos dados climatológicos.

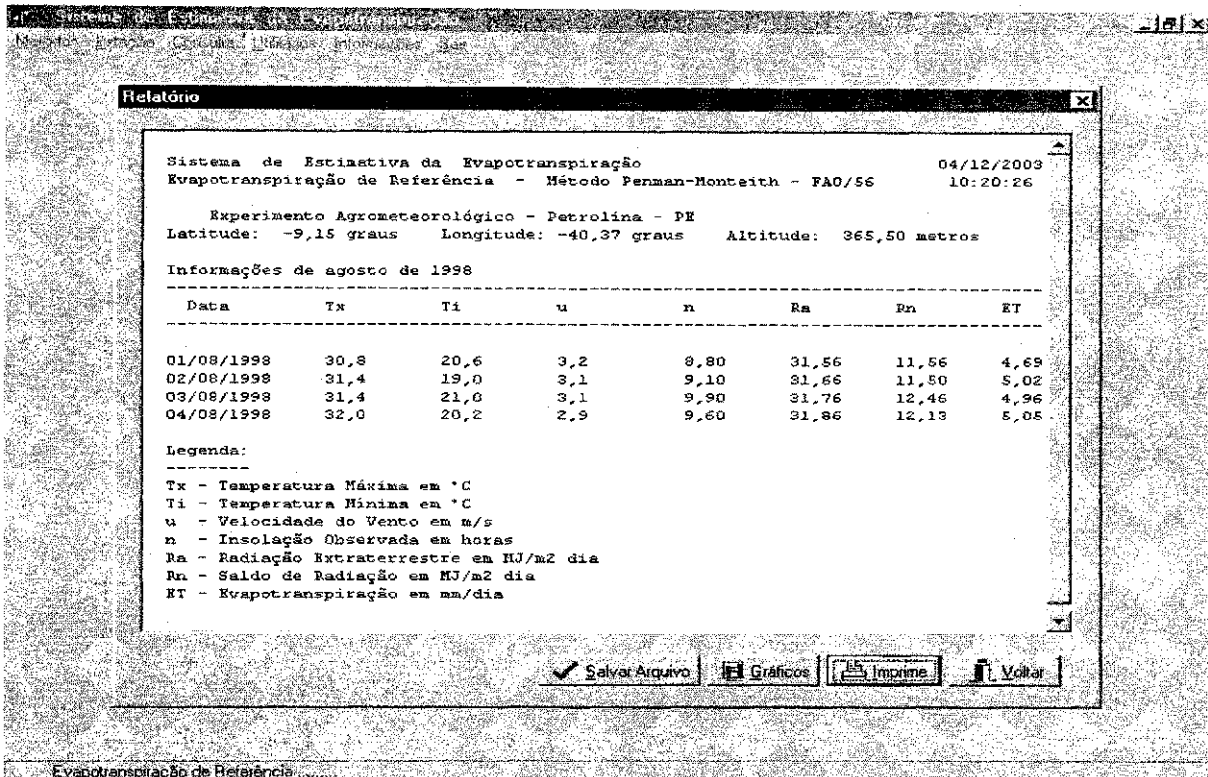


Figura 5. Relatório da estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith.

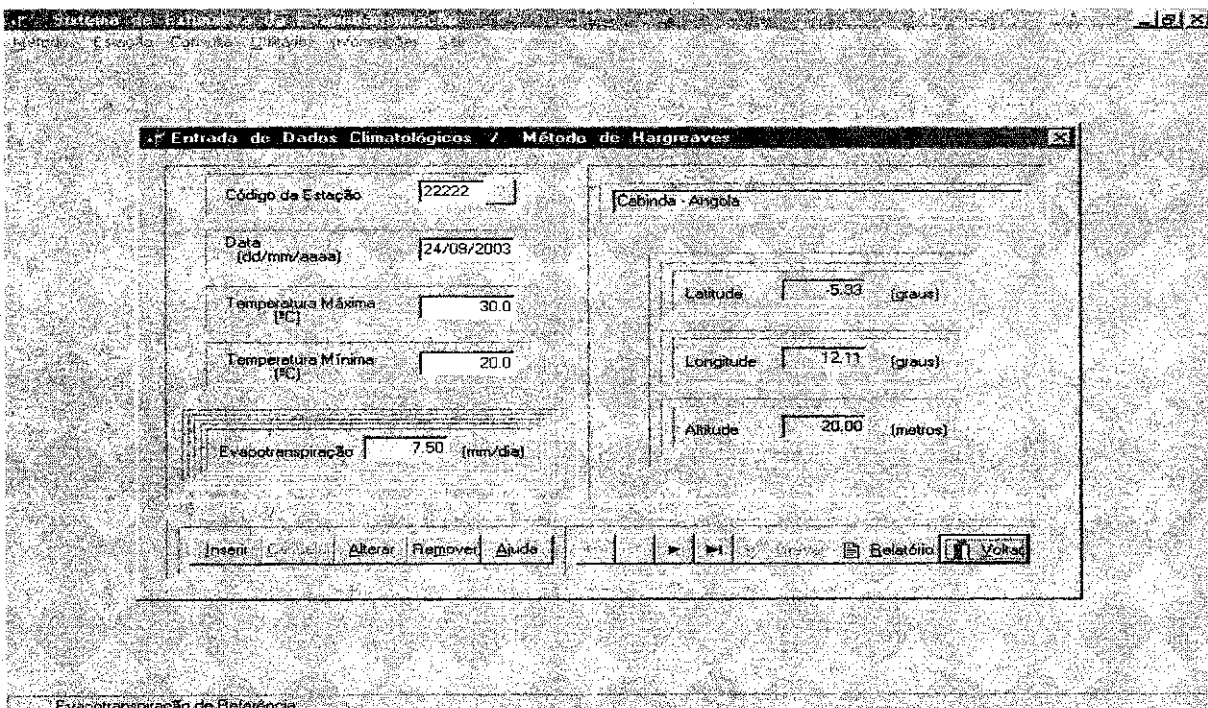


Figura 6. Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves.

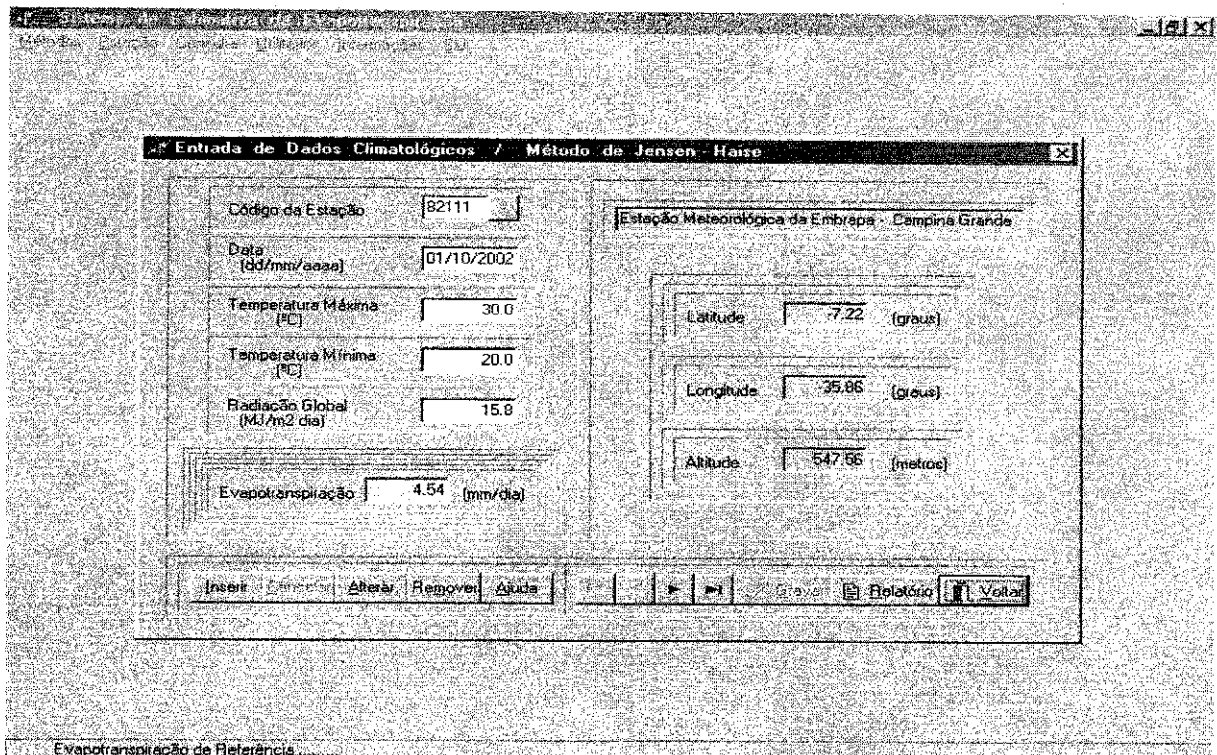


Figura 7. Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Jensen-Haise.

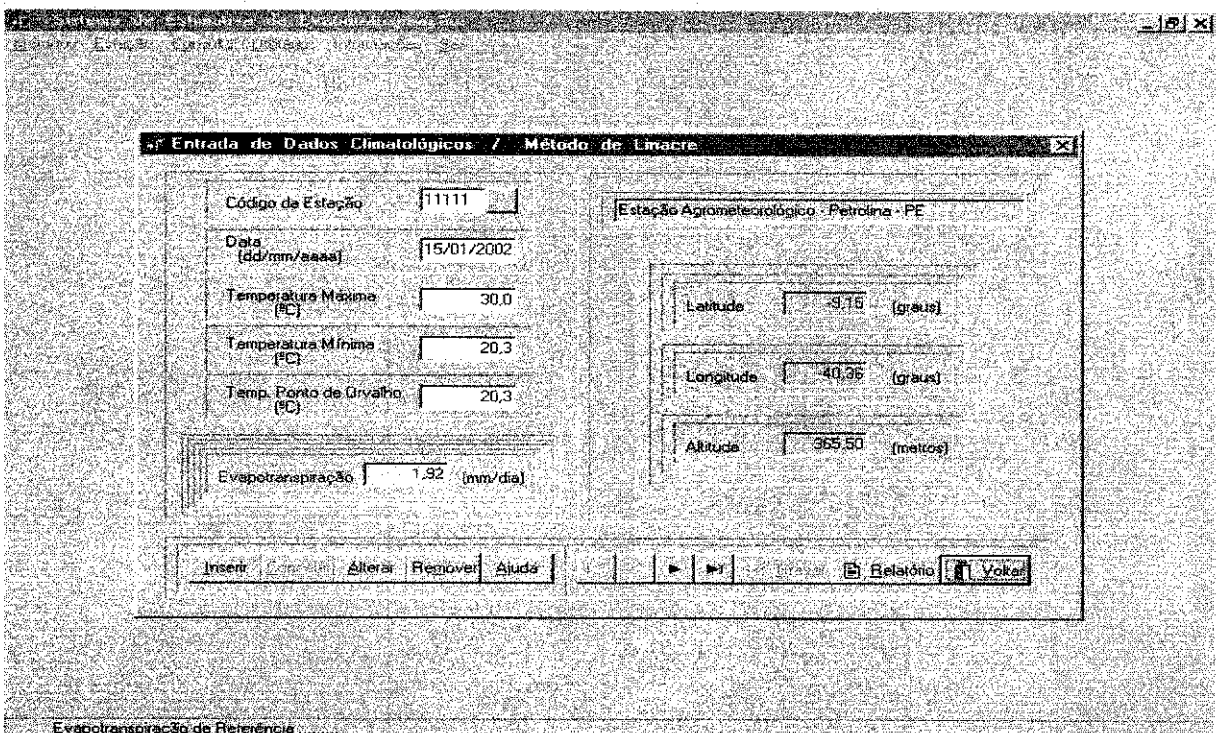


Figura 8. Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Linacre.

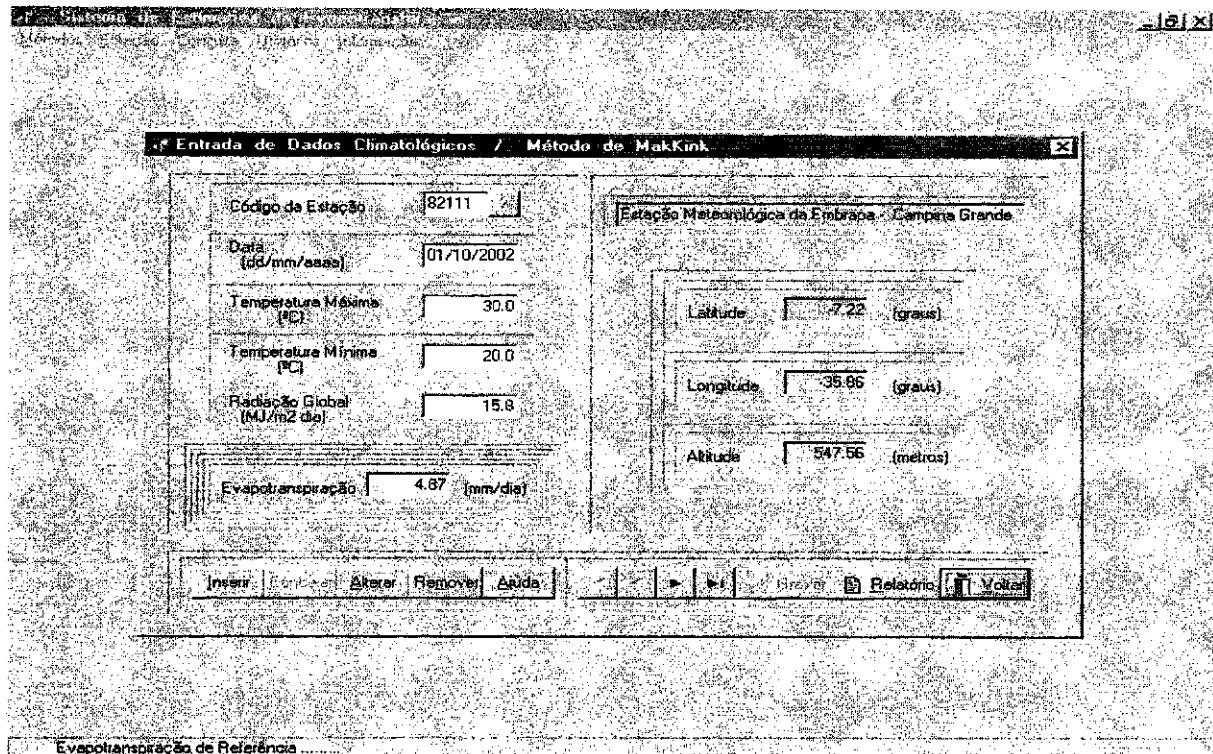


Figura 9. Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Makkink.

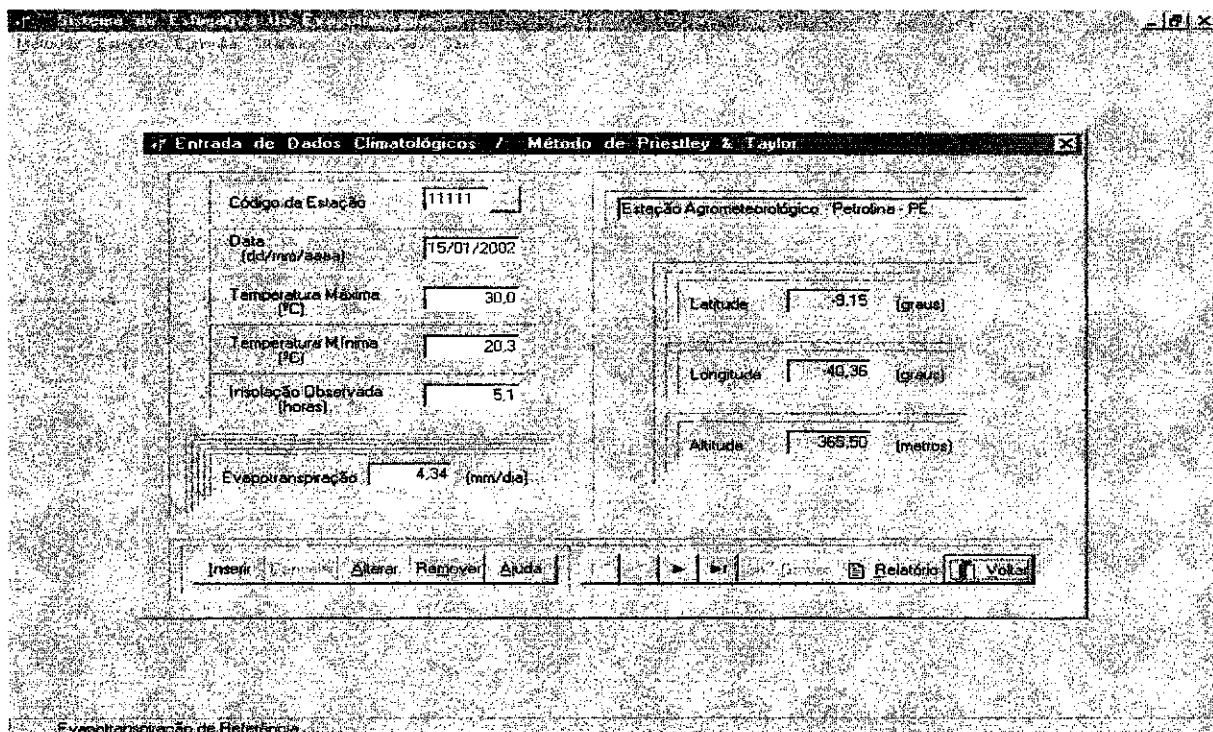


Figura 10. Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Priestley & Taylor.

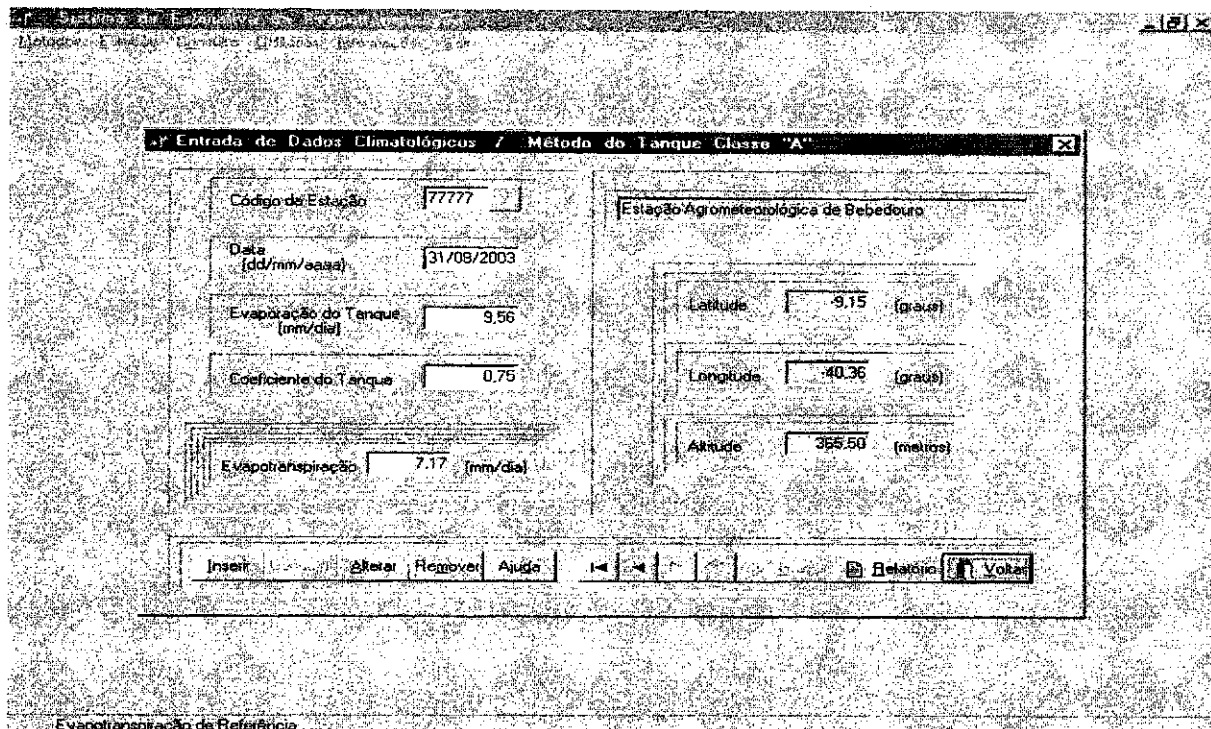


Figura 11 Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração de referência pelo método do Tanque “Classe A”.

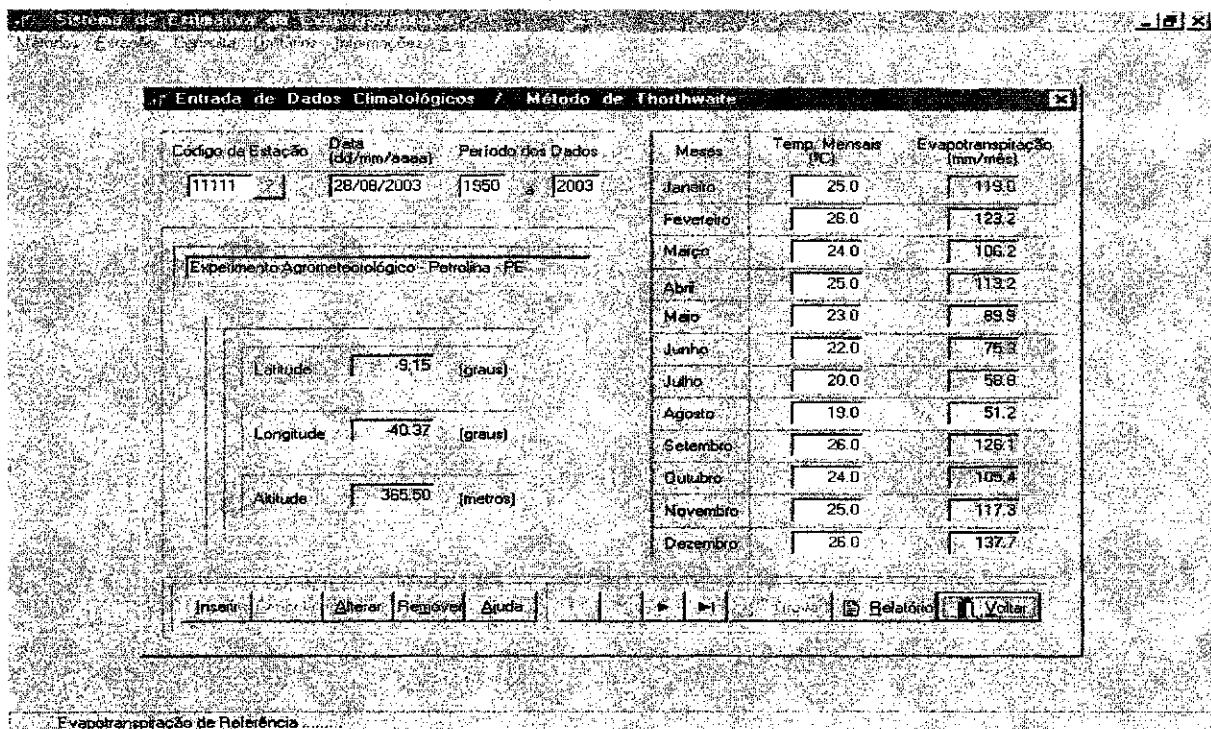


Figura 12. Caixa de diálogo para estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite.

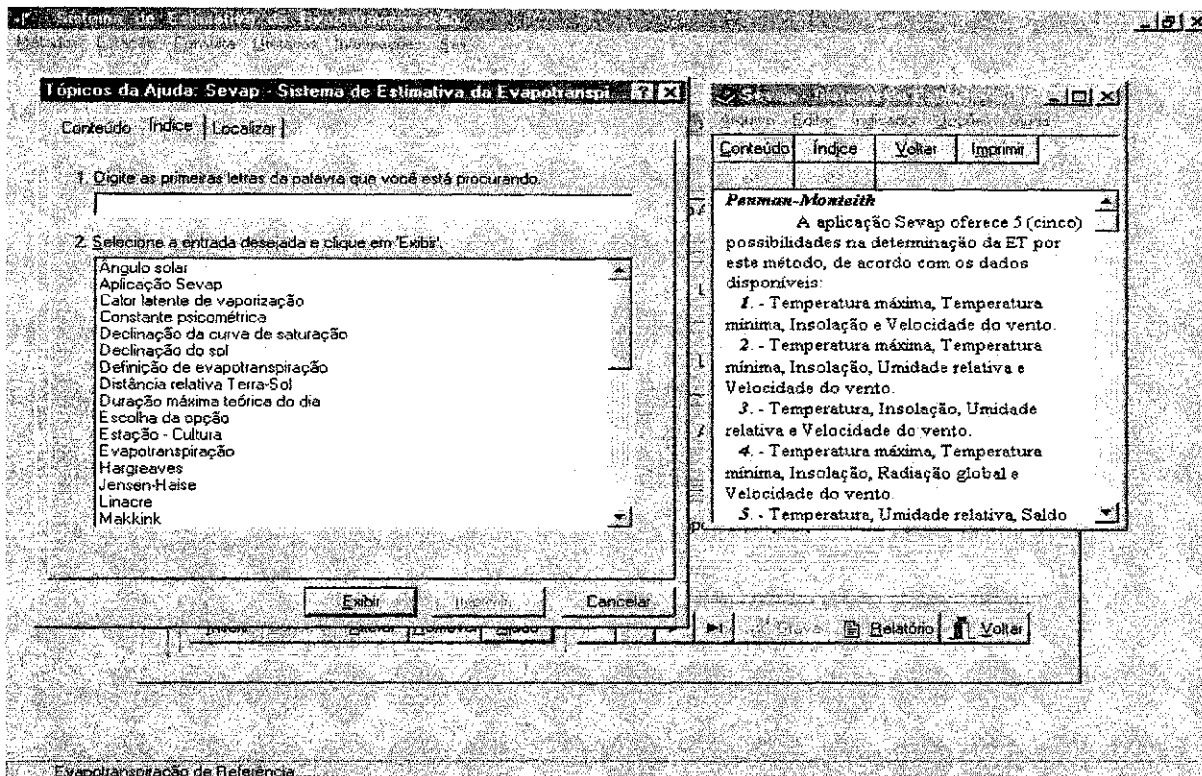


Figura 13. Detalhes dos recursos de Ajuda do SEVAP.

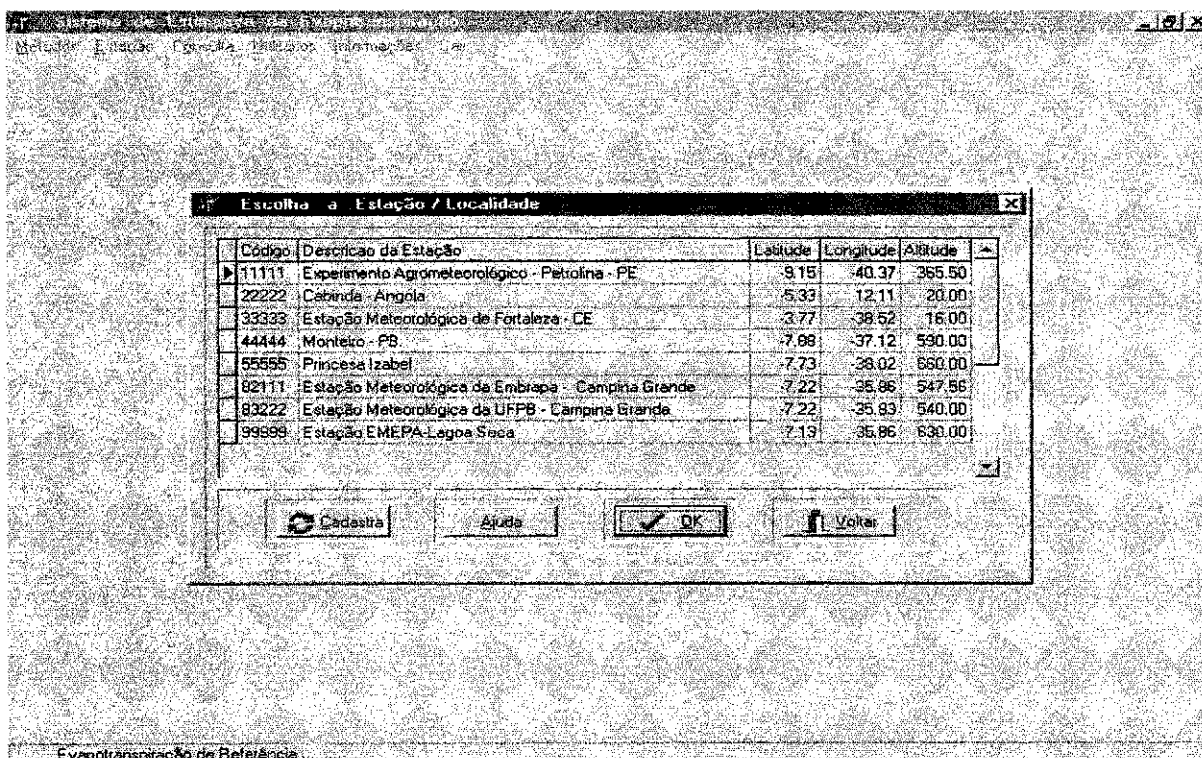


Figura 14. Janela de seleção da estação meteorológica para visualização do gráfico.

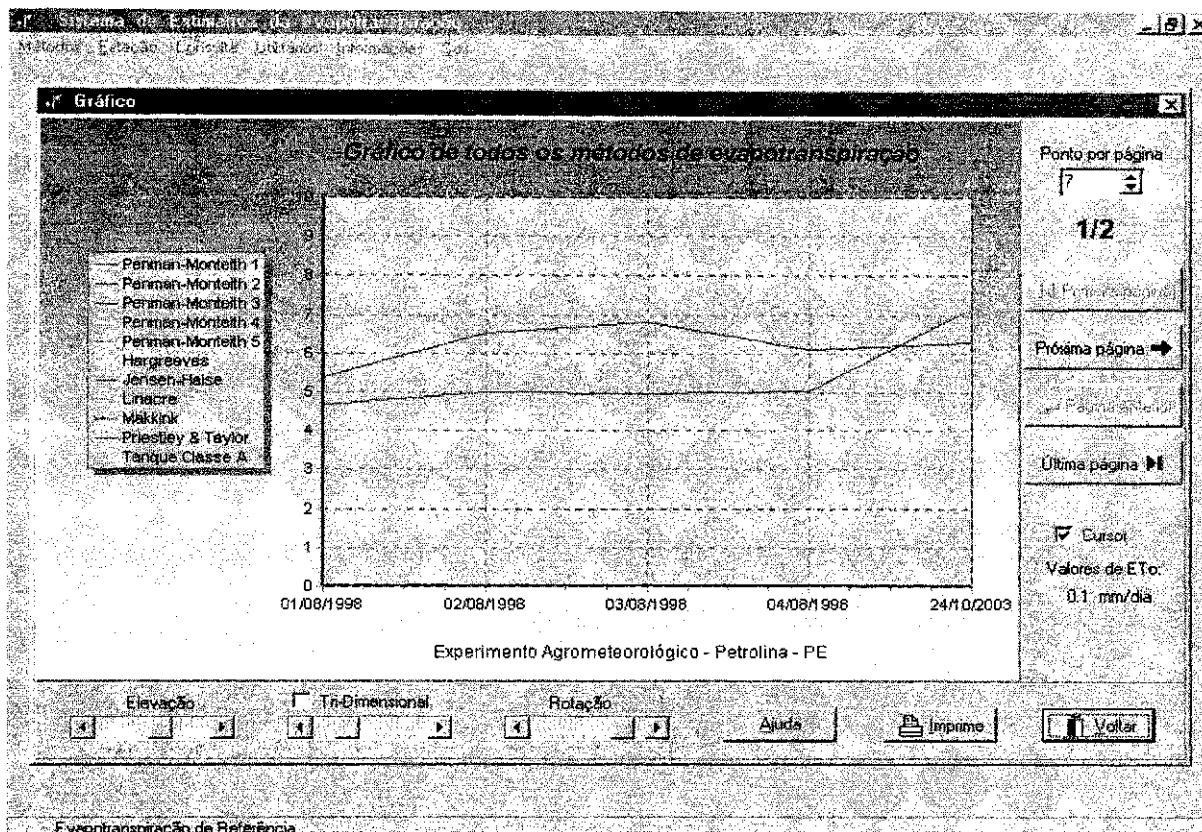


Figura 15. Opção gráfica de apresentação da evapotranspiração.

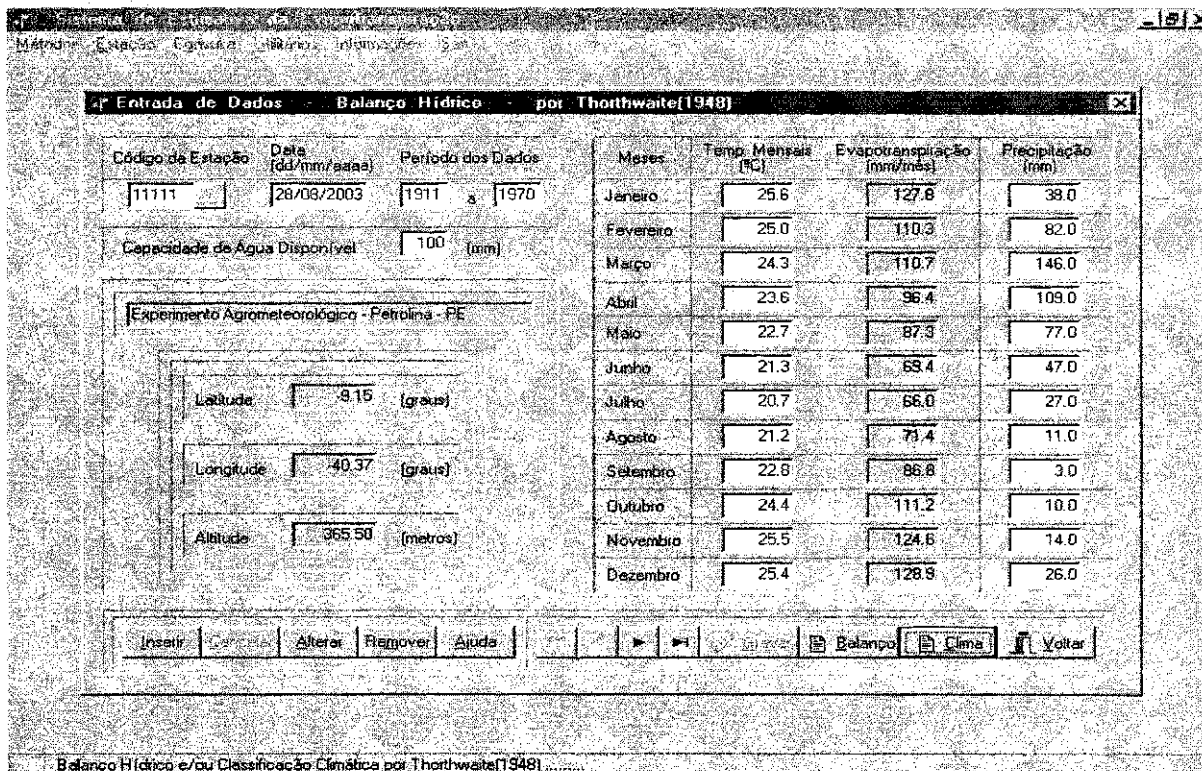


Figura 16. Caixa de diálogo para elaboração do balanço hídrico.

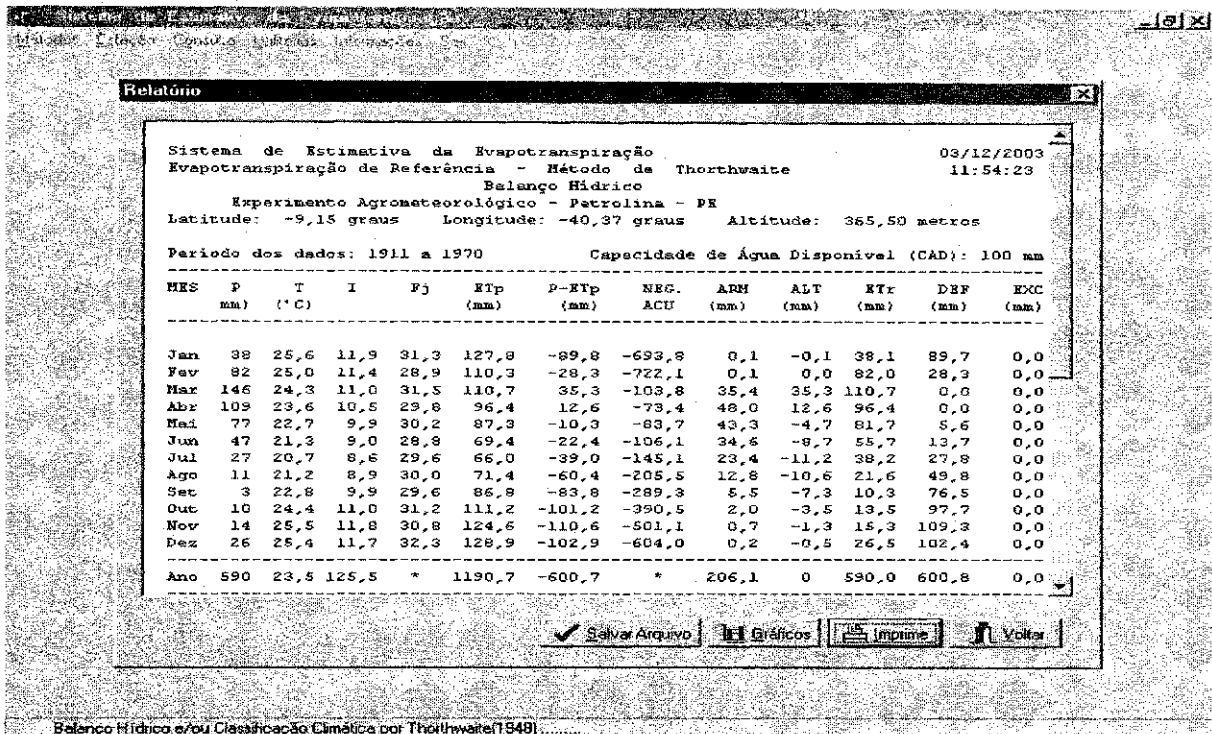


Figura 17. Relatório do balanço hídrico.

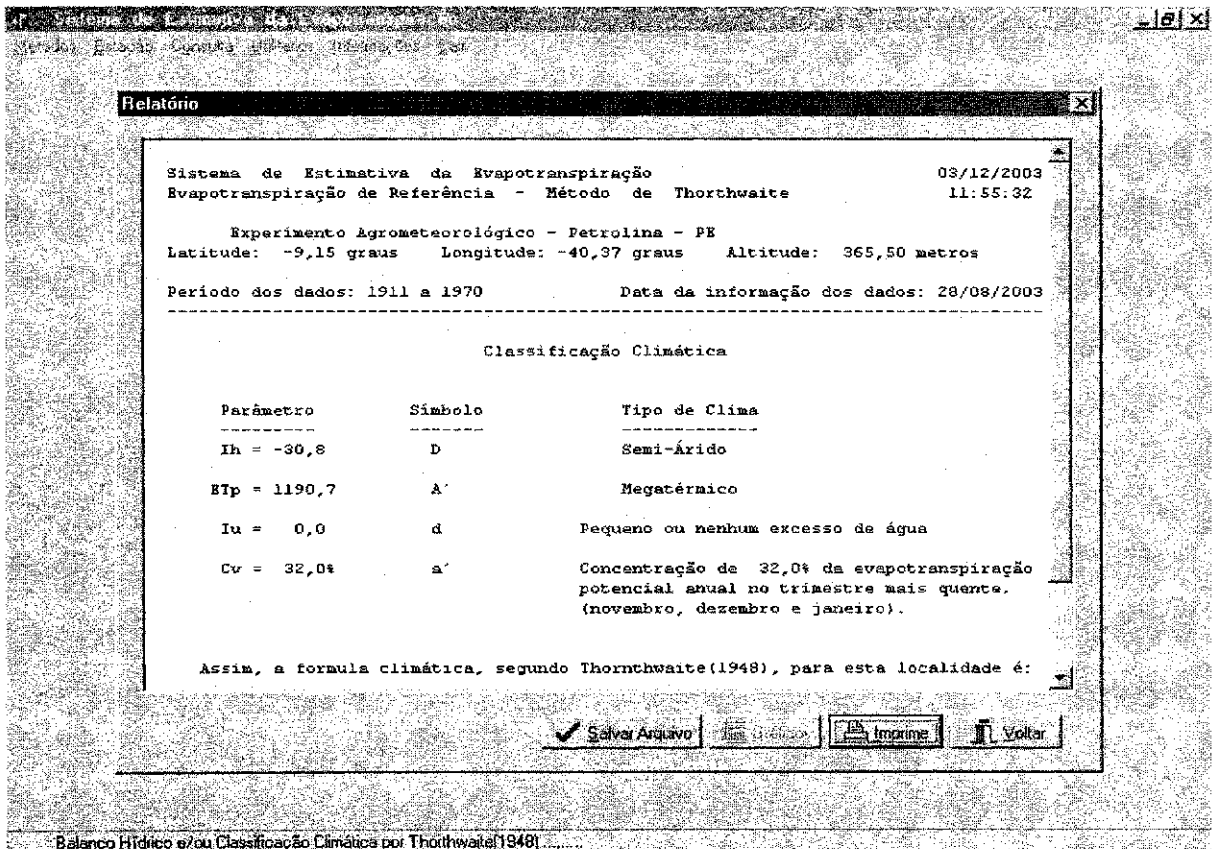


Figura 18. Classificação climática segundo Thornthwaite.

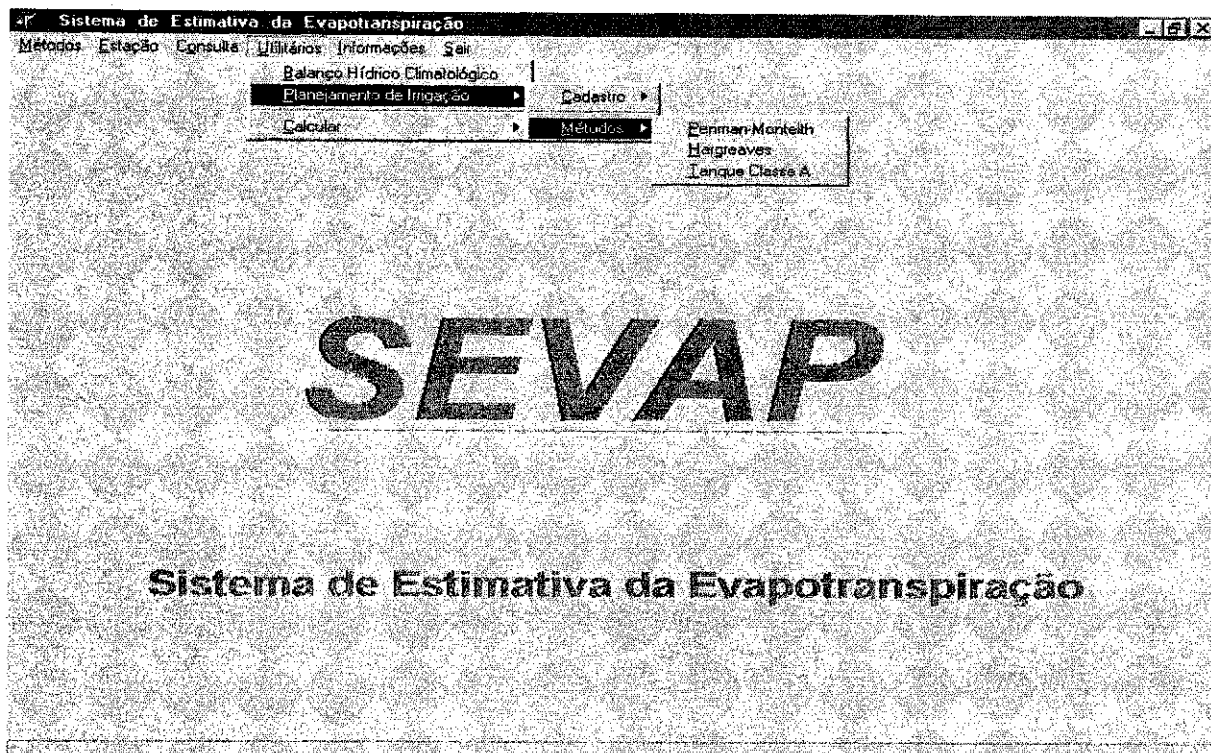


Figura 19. Algumas funções do *Utilitários* do SEVAP.

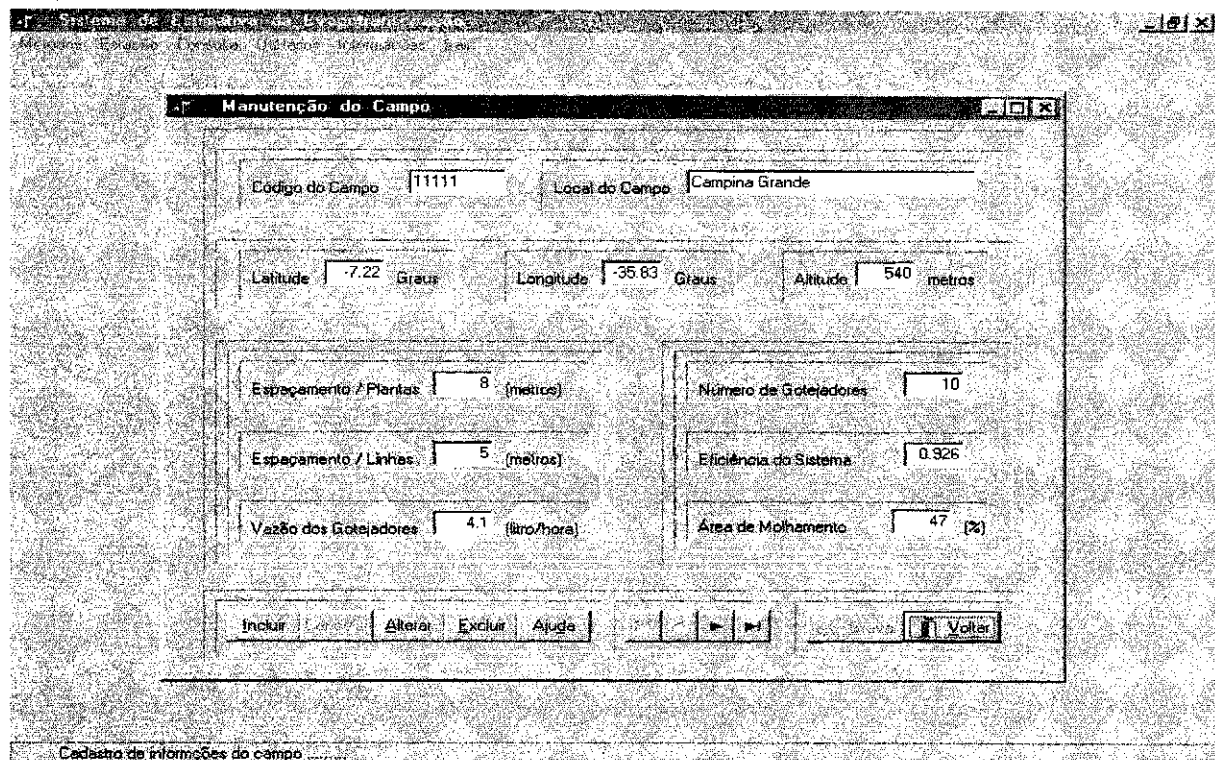


Figura 20. Cadastramento da área plantada.

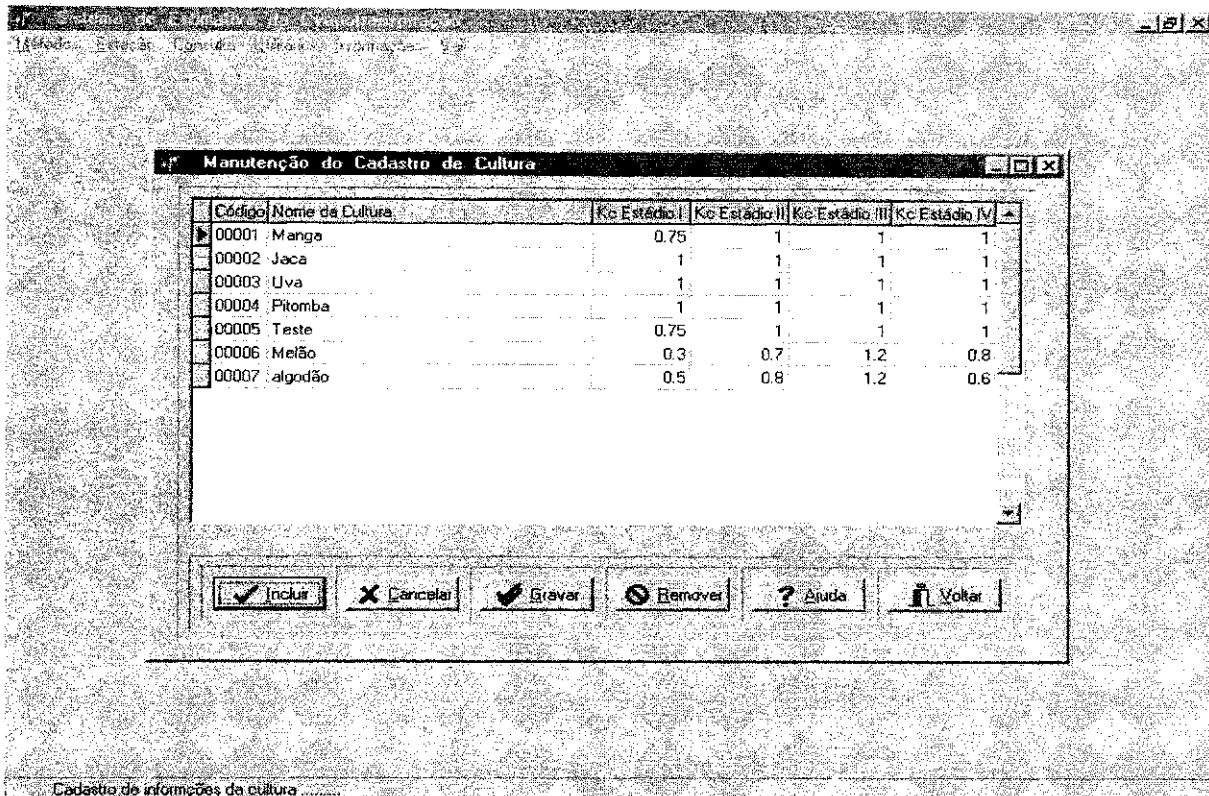


Figura 21. Cadastramento da cultura implantada.

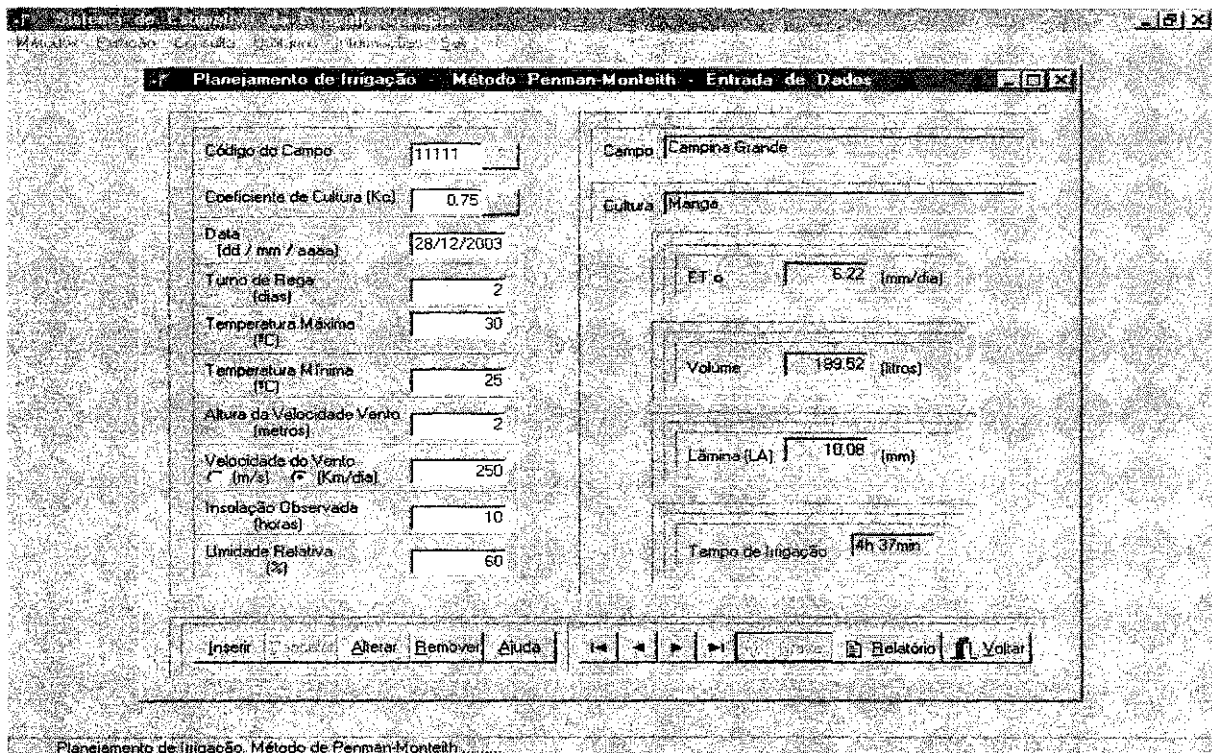


Figura 22. Caixa de diálogo para o planejamento da irrigação.

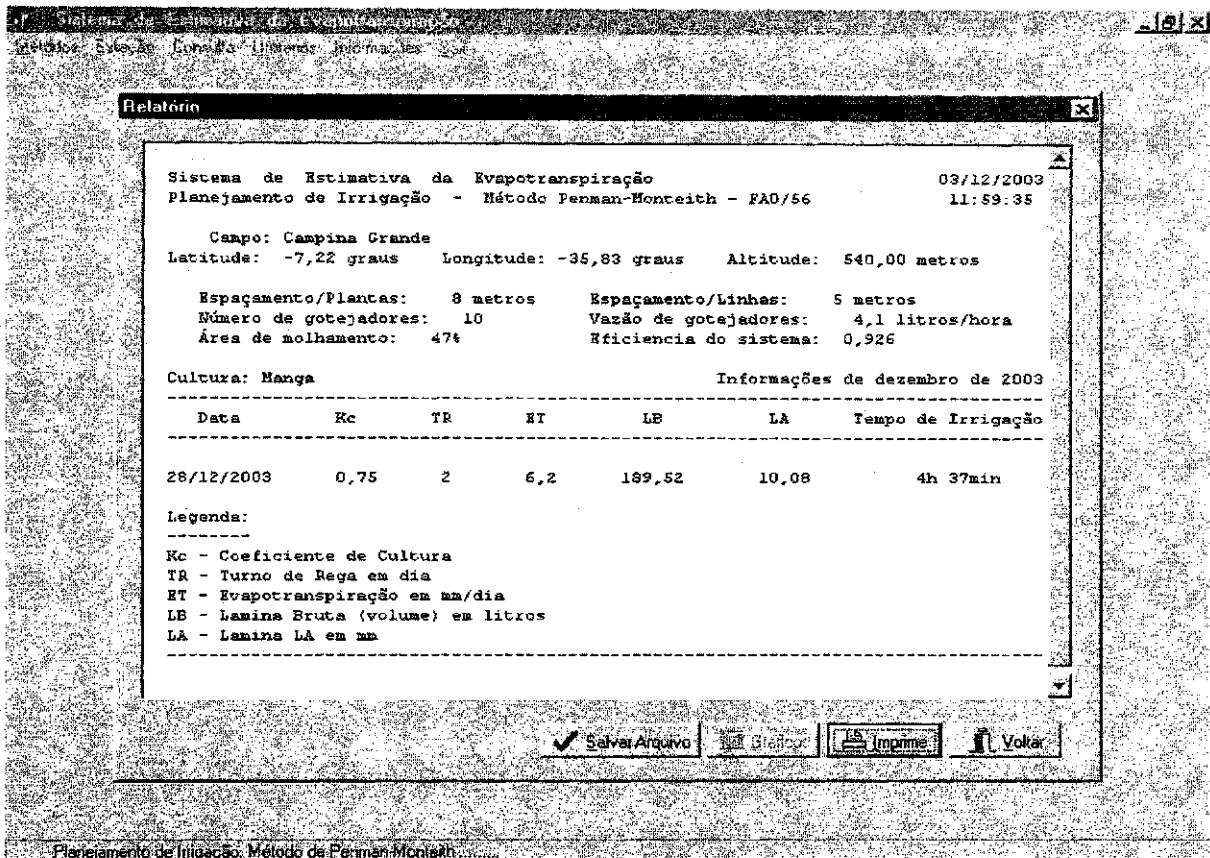


Figura 23. Relatório do planejamento da irrigação.

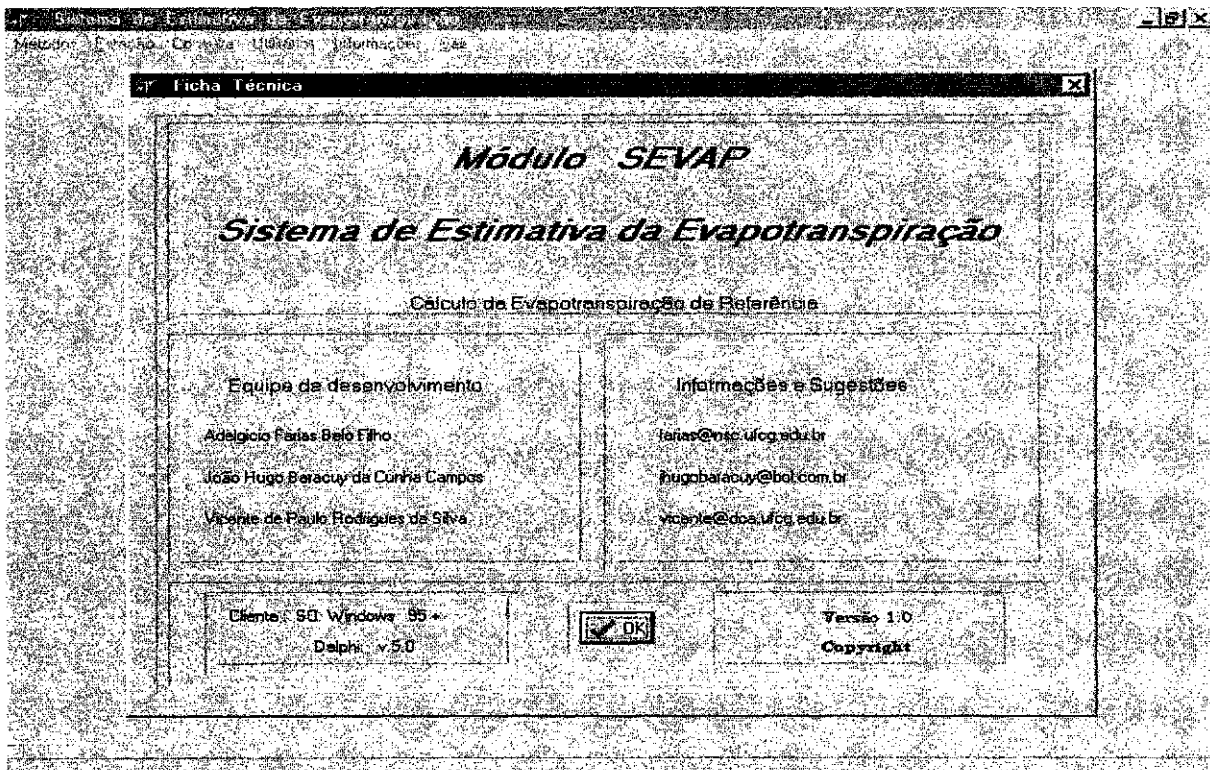


Figura 24. Informações sobre o módulo SEVAP.

4.1. Aplicação do modelo SEVAP

Os dados climatológicos da estação meteorológica da Embrapa-Algodão, em Campina Grande, PB, foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração, pelo método de Penman-Monteith, através dos *softwares* Sistema de Estimativa da Evapotranspiração (SEVAP) e *A Computer Program for Irrigation Planning and Management (CROPWAT)*. O resultado dos cálculos apresentou estimativas semelhantes da evapotranspiração de referência (ET_0). Ressalta-se que a versão do *software CROPWAT* utilizada no cálculo da evapotranspiração foi elaborado pela FAO e apresentado em ambiente MS-DOS. A diferença entre os valores de ET_0 , estimados pelos dois programas computacionais, é atribuída ao fato de que o CROPWAT oferece estimativas mensais da ET_0 , sempre com base no dia 15 de cada mês; enquanto, o SEVAP possibilita a estimativa diária em função da disponibilidade dos dados. A relação entre os valores de ET_0 , obtidos com base nos dois *softwares*, utilizando-se os dados da estação climatológica da Embrapa-Algodão referente ao mês de janeiro de 2001, é apresentada na Figura 25. Os valores de ET_0 obtidos pelo *software* SEVAP se ajustam muito àqueles obtidos pelo CROPWAT, apresentando coeficiente de determinação de 0,96. A comparação do *software* para o planejamento de irrigação elaborado por George *et al.* (2000) com o CROPWAT apresentou valores similares de umidade do solo, com coeficiente de determinação de 0,98.

A comparação mais detalhada entre os *softwares* é exibida na Figura 26, onde observa-se que, muito embora o método de cálculo seja o mesmo (Penman-Monteith), os dois programas apresentam valores da evapotranspiração de referência levemente diferentes durante o período analisado. Essa figura evidencia ainda que os valores de ET_0 , obtidos pelo SEVAP, são sistematicamente inferiores àqueles obtidos pelo CROPWAT, exceto no décimo

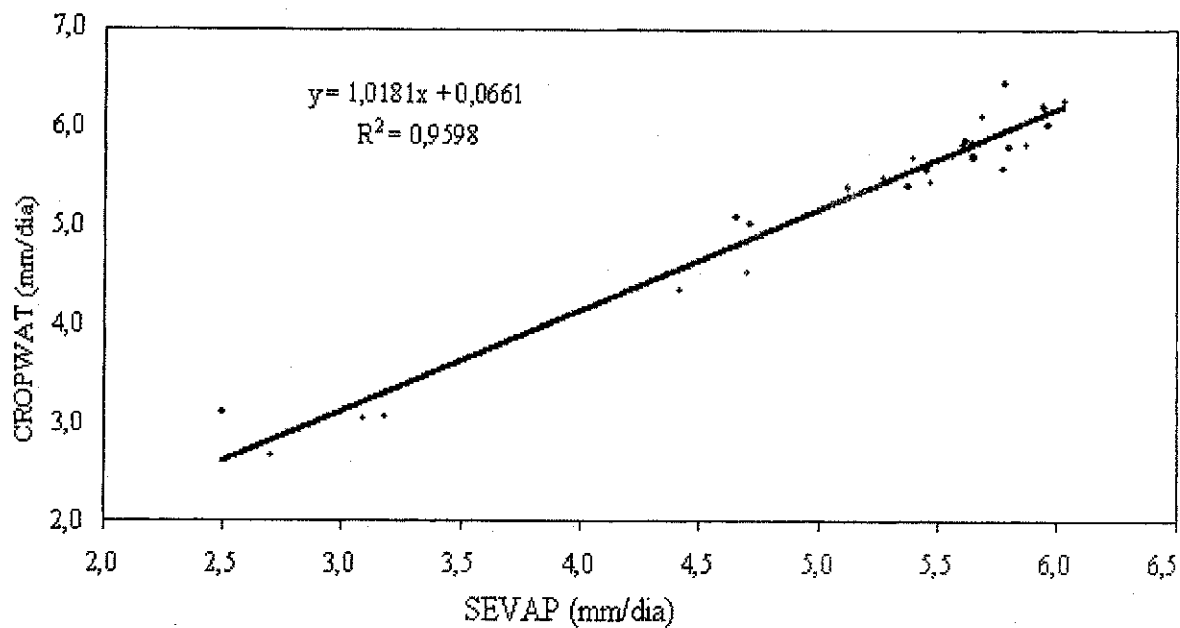


Figura 25. Relação entre os valores da evapotranspiração de referência calculados pelos softwares CROPWAT e SEVAP, com dados coletados no mês de janeiro de 2001 em Campina Grande, PB

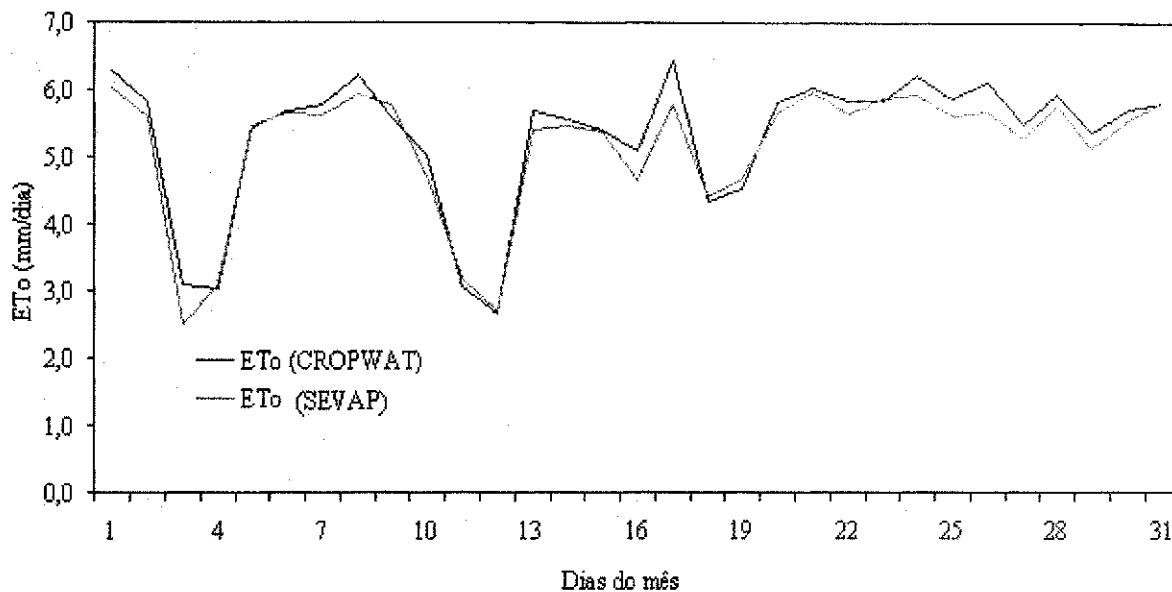


Figura 26. Curso temporal da evapotranspiração de referência, durante o mês de janeiro de 2001, em Campina Grande, PB, calculada pelos softwares CROPWAT e SEVAP

quinto dia do mês. Essas diferenças são atribuídas ao fato de que o CROPWAT estima a ET_0 com base na declinação do sol do dia 15 de cada mês. Esses resultados indicam que o *software* SEVAP, além de ser interativo com o usuário, possibilita estimativas confiáveis e contínuas da evapotranspiração de referência. Além disso, através do SEVAP é possível estimar a ET_0 utilizando-se a temperatura mínima em substituição à temperatura do ponto de orvalho com vistas a eliminação do cálculo da umidade relativa. Procedimento semelhante foi utilizado por Smith *et al.* (1996) que, revisando a metodologia de determinação das necessidades hídricas de culturas, reconheceram a equação de Penman-Monteith como método padrão na determinação da evapotranspiração de culturas e de referência. Essa opção do *software* deve ser vista com cautela, porque em regiões áridas e semi-áridas o ar pode não condensar a temperatura mínima, e nesse caso, a temperatura do ponto de orvalho não se aproxima da temperatura mínima do dia, o que pode conduzir a erros apreciáveis no cálculo da ET_0 .

Na Figura 27 é exibida a comparação entre os métodos de estimativa da evapotranspiração com base em dados mensais do ano de 2002 da estação climatológica de Bebedouro, Petrolina, PE. Os valores da evapotranspiração foram calculados sempre para o dia 15 de cada mês. Observa-se que todos os métodos, exceto os de Linacre e Thornthwaite, apresentaram comportamento similar no período analisado. Os métodos de Penman-Monteith, Hargreaves, Jensen-Haise, Makkink, Priestley & Taylor e Tanque “Classe A” reproduziram o ciclo intra-anual da demanda atmosférica, com os maiores valores no período seco e menores no período chuvoso. Dentre esses métodos, o que apresentou maior discrepância em relação ao de Penman-Monteith foi o do Tanque “Classe A”, que chegou a atingir 7,6 mm/dia no mês de novembro, enquanto os outros métodos indicaram valores inferiores a 6 mm/dia. Por outro lado, os métodos de Linacre e de

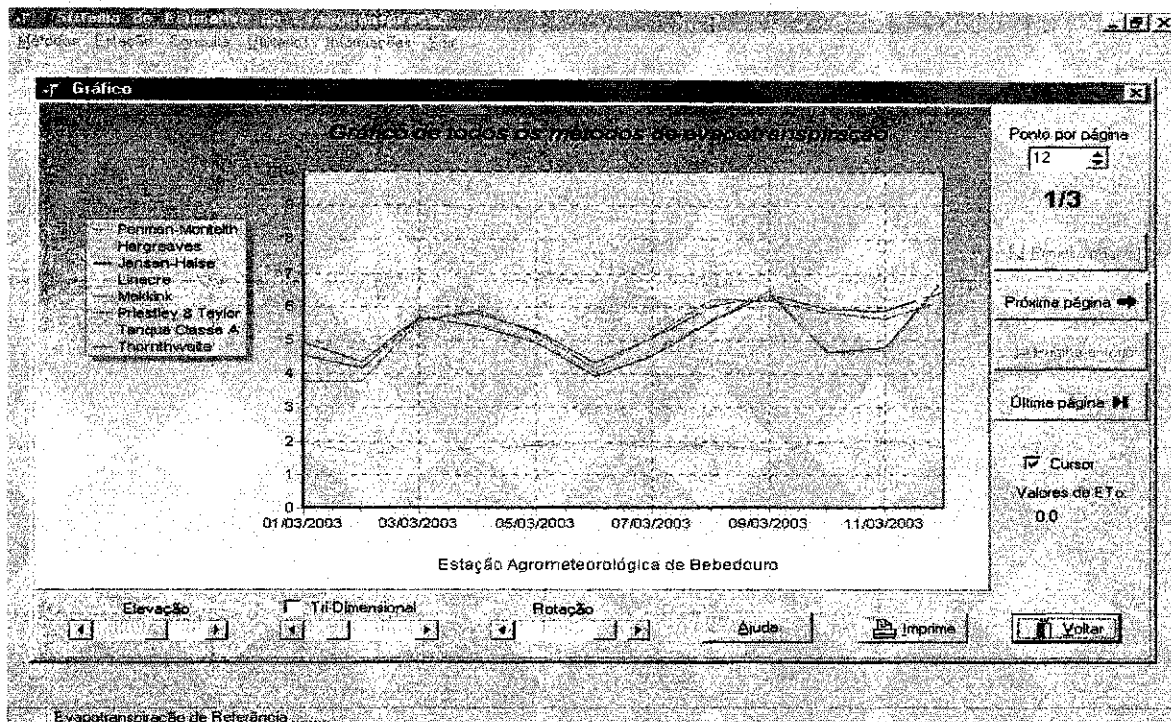


Figura 28. Comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração com base em dados diários do mês de março de 2003.

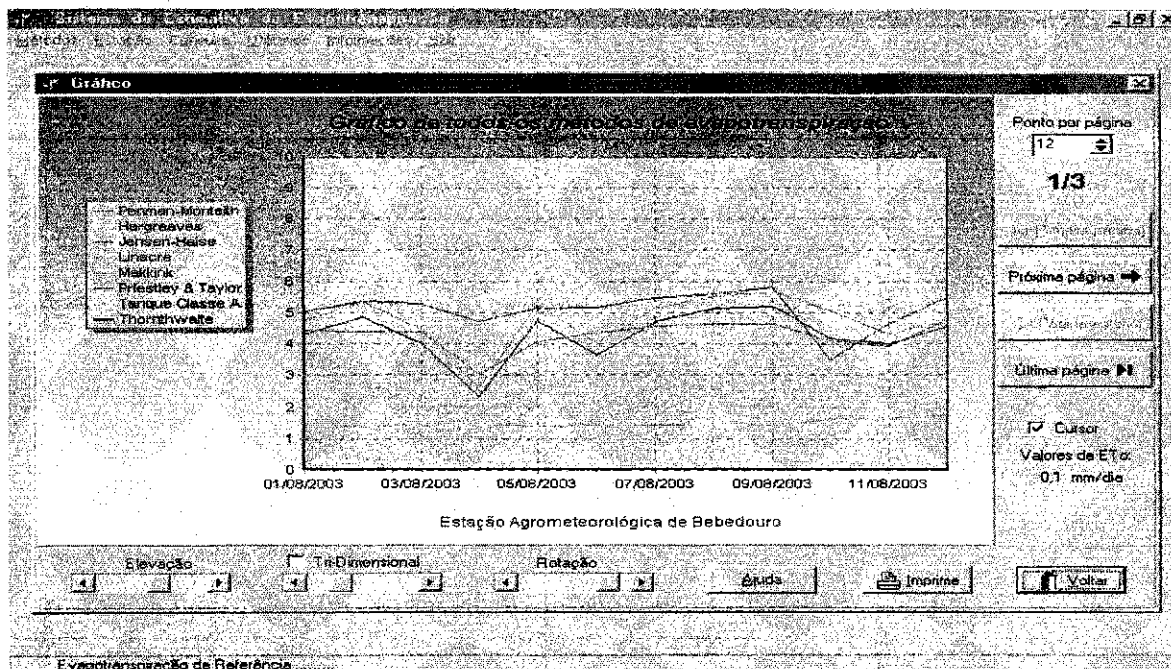


Figura 29. Comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração com base em dados diários do mês de agosto de 2003.

são exibidas nas Figuras 28 e 29, respectivamente. Nestas figuras, os gráficos não apresentam os valores da evapotranspiração estimada pelo método de Thornthwaite, porque esse método foi utilizado apenas para estimativas mensais. De acordo com estas figuras, observa-se que também para períodos diários os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Linacre foram em torno de 2 mm/dia, além do fato de nos meses de março e agosto, terem ficado muito abaixo daqueles estimados pelos demais métodos. Ortega-Farias *et al.* (1995) observaram que os modelos de Thornthwaite e Priestley & Taylor sempre subestimam os valores da evapotranspiração quando comparados com o método de Penman-Monteith.

As Figuras 30 a 32 exibem o curso temporal da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, com opções variadas de cálculo. Estas opções variam em função das variáveis atmosféricas de entrada no sistema, ou seja, da disponibilidade de dados. Na opção 1 (Op - 1) as variáveis necessárias são: temperatura máxima, temperatura mínima, insolação e velocidade do vento; opção 2 (Op - 2): temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento; opção 3 (Op - 3): temperatura média do ar, insolação, umidade relativa e velocidade do vento; opção 4 (Op - 4): temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, radiação global e velocidade do vento. Não foi utilizada a opção 5 (Op - 5) porque os dados de saldo de radiação não estão disponíveis para o local e ano analisados.

De acordo com a Figura 30, observa-se que os valores da evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith, durante o ano de 2002, em Petrolina, PE, utilizando-se a opção 1 (Op - 1), superestimam os valores obtidos pelas demais opções; enquanto que a opção 4 (Op-4) subestima as anteriores. As opções 2 e 3 apresentaram valores de evapotranspiração praticamente iguais em todo o período analisado. Em princípio, a opção 4 deve apresentar valores de evapotranspiração mais precisos, em razão da ausência de parametrização da radiação global.

Os cursos temporais da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, com as quatro opções de cálculo, referentes aos meses de março e agosto de 2003, são exibidos nas Figuras 31 e 32, respectivamente. Estas figuras também evidenciam que a opção 4 subestima os valores das outras opções e, inversamente, a opção 1 superestima as opções 2, 3 e 4. Os valores das opções 2 e 3, entretanto, não são rigorosamente iguais durante esses meses como são no período anual. A diferença entre os dados de entrada nessas opções consiste no fato de que a opção 2 utiliza as temperaturas máxima e mínima do ar, enquanto a opção 3 utiliza a temperatura média do ar.

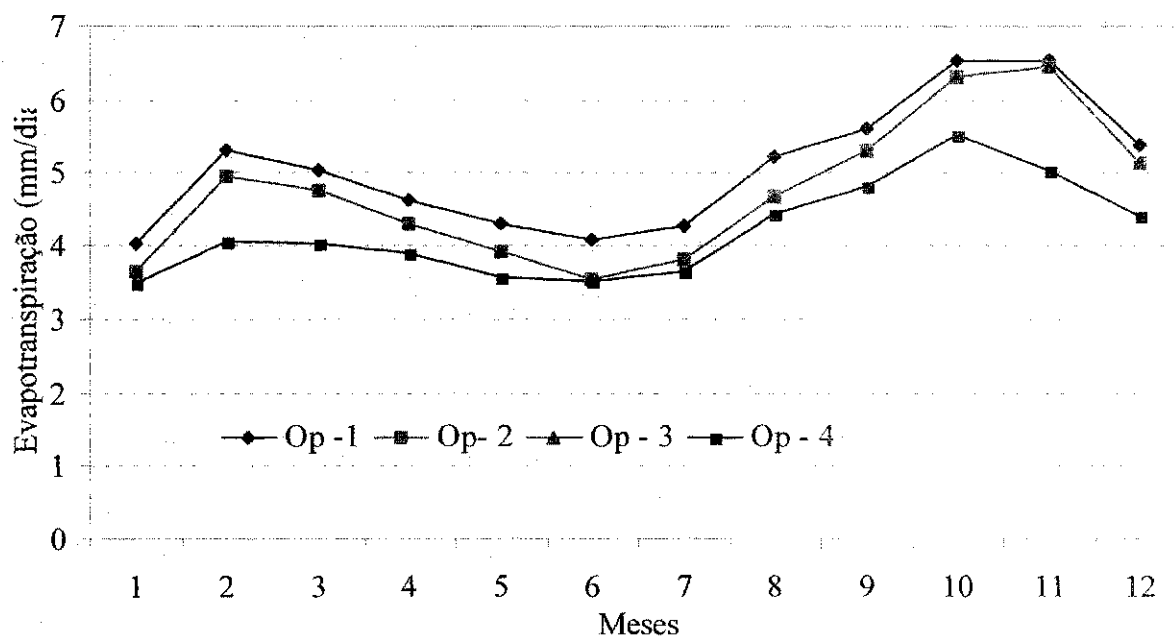


Figura 30. Curso temporal da evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith, com opções variadas de cálculo, para o ano de 2002, em Petrolina, PE.

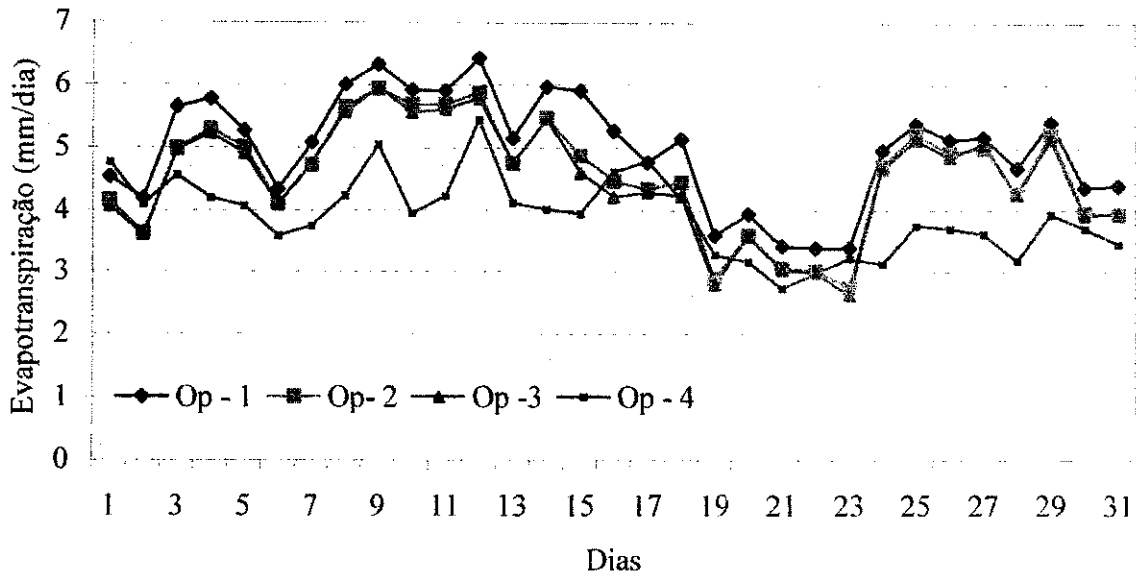


Figura 31. Curso temporal da evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith, com opções variadas de cálculo, para o mês de março de 2003, em Petrolina, PE.

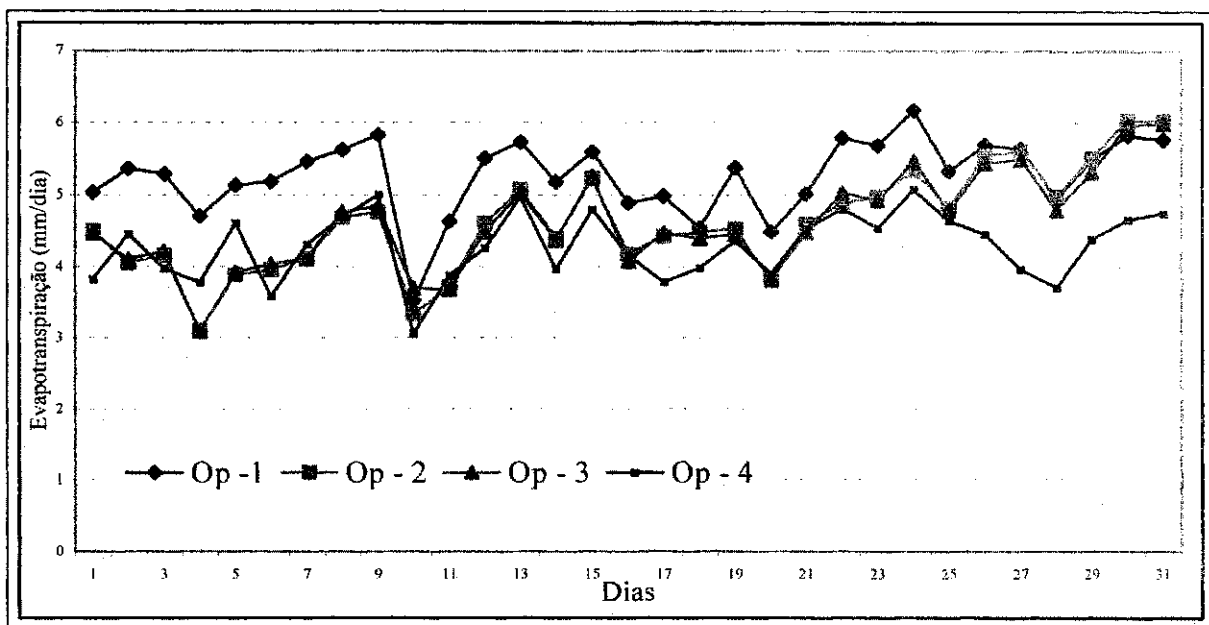


Figura 32. Curso temporal da evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith, com opções variadas de cálculo, para o mês de agosto de 2003, em Petrolina, PE.

A Tabela 2 exibe os coeficientes de determinação entre os valores da evapotranspiração calculada pelo método de Penman-Monteith e demais métodos utilizados no estudo, com base nos dados climáticos diários dos meses de março e agosto de 2003 e nas médias mensais do ano de 2002, da estação climatológica de Petrolina, PE.

Tabela 2. Coeficientes de determinação entre os valores da evapotranspiração de referência calculados pelo método de Penman-Monteith e demais métodos utilizados no estudo.

Método/ Período	Hargreaves	Jensen- Haise	Linacre	Makkink	Priestley- Taylor	Tanque Classe A	Thornthwaite
Ano	0,77	0,81	0,047	0,72	0,77	0,87	0,18
Março	0,66	0,65	0,050	0,58	0,91	0,36	-
Agosto	0,62	0,39	0,003	0,32	0,42	0,10	-

Nessa comparação, utilizou-se o método de Penman-Monteith como padrão, conforme estabelecido pela FAO, para a estimativa da evapotranspiração de referência. Em geral, os valores obtidos na base mensal se ajustam muito bem com os outros métodos, exceto com os de Linacre e de Thornthwaite. O método do Tanque “Classe A” foi o que apresentou maior coeficiente de determinação (0,87) na base mensal; entretanto, com dados diários esses coeficientes foram reduzidos drasticamente chegando, inclusive, ao valor de 0,10 no mês de agosto. Silva et al. (2001), quando compararam os métodos de Hargreaves e do Tanque “Classe A” com o método de Penman-Monteith, obtiveram coeficientes de determinações de 0,88 e de 0,71 respectivamente.

Apenas o método de Hargreaves apresentou coeficiente de determinação satisfatórios nos períodos diários e mensais. Sugere-se, assim que, na ausência de dados insolação e velocidade do vento, a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-

Monteith pode ser substituída com razoável precisão pelo método de Hargreaves. Por outro lado, os métodos de Linacre e de Thornthwaite não oferecem estimativas confiáveis da evapotranspiração, em razão dos baixos coeficientes de determinação com o método padrão da FAO.

Nesse estudo não foi analisado o relacionamento da evapotranspiração diária obtida pelos métodos de Thornthwaite e Penman-Monteith, que, certamente, apresentaria coeficiente de determinação ainda menor do que 0,18, como foi na base mensal. Os baixos coeficientes de determinação obtidos com o método de Linacre são atribuídos ao fato de que foi assumido a temperatura do ponto de orvalho como sendo igual a temperatura mínima, em razão da ausência dessa informação. Apesar desse pressuposto poder ser perfeitamente aplicado no caso em análise, pois em regiões áridas e semi-áridas o ar atmosférico se condensa à temperatura mínima (Allen et al., 1998), entretanto, qualquer conclusão acerca da eficiência desse método não deve ser conclusiva.

As médias e os desvios-padrão das série temporais anual de 2002 e dos meses de março e agosto de 2003 dos valores da evapotranspiração, em Petrolina, PE, calculadas pelos métodos estudados são apresentados na Tabela 3. Mais uma vez fica evidenciada a ineficiência dos métodos de Linacre e de Thornthwaite no cálculo da evapotranspiração. Observa-se que os métodos apresentaram médias semelhantes, em todos os períodos analisados, exceto os de Linacre e de Thornthwaite, que exibiram valores médios muito baixos, de 1,8 e de 3,28, respectivamente.

A Tabela 4 apresenta os coeficientes de determinação entre os valores da evapotranspiração calculada pelo método de Penman-Monteith (Op - 4) com as demais opções de cálculo. Essa última opção foi utilizada como referência porque nela a radiação global não é parametrizada. No período anual os coeficientes de determinação foram bastante altos e iguais a 0,96, nas opções de cálculo 1, 2 e 3. Entretanto, quando o relacionamento foi

feito com os valores diários dos meses de março e agosto, os coeficientes de determinação foram relativamente baixos.

Tabela 3. Médias e desvios-padrão (entre parênteses) das séries temporais anual de 2002 e dos meses de março e agosto de 2003 dos valores da evapotranspiração calculada pelos métodos utilizados no estudo, em Petrolina-PE.

Método/ Período	Penman- Monteith	Hargreaves	Jensen- Haise	Linacre	Makkink	Priestley- Taylor	Tanque Classe A	Thornthwaite
Ano	5,08 (0,86)	5,30 (0,75)	4,83 (0,76)	1,80 (0,12)	5,03 (0,73)	4,74 (0,90)	5,26 (1,33)	3,28 (0,78)
Março	4,99 (0,87)	5,63 (0,45)	4,81 (0,89)	1,83 (0,22)	4,93 (0,86)	4,99 (0,94)	5,21 (1,22)	- (-)
Agosto	5,27 (0,53)	4,98 (0,48)	4,58 (0,82)	1,63 (0,23)	4,88 (0,81)	4,52 (0,63)	5,98 (0,92)	- (-)

Tabela 4. Coeficientes de determinação entre os valores da evapotranspiração calculada pelo método de Penman-Monteith (Op - 4) e demais opções.

Opções/ Período	Op - 1	Op - 2	Op - 3
Ano	0,96	0,96	0,96
Março	0,49	0,40	0,38
Agosto	0,67	0,35	0,36

As médias e desvio-padrão das séries temporais anual e dos meses de março e agosto de 2002 dos valores da evapotranspiração calculada pelo método de Penman-Monteith, de acordo com as opções 1 a 4 são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Média e desvio-padrão (entre parênteses) das séries temporais anual de 2002 e dos meses de março e agosto de 2003, dos valores da evapotranspiração calculada pelas opções 1 a 4.

Opções/ Período	Op - 1	Op - 2	Op - 3	Op - 4
Ano	5,08 (0,86)	4,74 (0,96)	4,74 (0,96)	4,20 (0,65)
Março	4,99 (0,87)	4,57 (0,90)	4,50 (0,90)	3,92 (0,63)
Agosto	5,27 (0,53)	4,62 (0,72)	4,61 (0,68)	4,29 (0,48)

Os valores médios da evapotranspiração utilizando-se a opção 1 do modelo SEVAP foram maiores do que aqueles obtidos com as demais opções, independentemente do período analisado; enquanto a opção 4 apresentou as menores médias, também nos três períodos estudados.

5. CONCLUSÕES

O programa computacional SEVAP (Sistema de Estimativa de Evapotranspiração), em face da sua simplicidade operacional e interatividade com o usuário, apresenta-se com grande aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento, tais como: engenharia de irrigação, agronomia, meteorologia, agrometeorologia, hidrologia, etc., além de ser útil para consultores da área de irrigação, bem como com propósitos acadêmicos. Os resultados aqui apresentados com a aplicação dos dados climatológicos de Campina Grande, PB, do ano de 2001, e de Petrolina, PE, do ano de 2002, permitem concluir que o modelo SEVAP possibilita estimativas confiáveis e contínuas da evapotranspiração. Além disso, pode ser utilizado no monitoramento local e regional da evapotranspiração potencial em escala diária ou mensal. Com o modelo SEVAP é possível obter-se estimativas da evapotranspiração em função da disponibilidade de dados climatológicos, desde a leitura mais simples, como a evaporação do

Tanque “Classe A” ou temperatura do ar, até a mais elaborada, tal como o saldo de radiação ou radiação global.

A comparação entre os métodos, possíveis de serem monitorados pelo modelo SEVAP, indica que os métodos de Linacre e Thornthwaite não apresentam estimativas confiáveis de evapotranspiração em relação ao método de Penman-Monteith. Dentre todos os métodos analisados apenas o de Hargreaves apresentou coeficientes de determinação satisfatórios nos períodos diários e mensais. Dessa constatação, conclui-se que, na ausência de dados de insolação e velocidade do vento, a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith pode ser substituída com razoável precisão pelo método de Hargreaves. Por outro lado, as estimativas da evapotranspiração pelos métodos Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor e Tanque “Classe A” devem ser realizadas com cautela, em razão dos baixos coeficientes de correlação com o método padrão da FAO (Penman-Monteith).

A precisão da estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith varia em função da seleção das variáveis de entrada do modelo. Evidentemente, quanto menor o número de parametrização utilizada na obtenção das variáveis do modelo, maior será o nível de precisão de estimativa da evapotranspiração. Entretanto, apesar disso, a utilização da opção 1 do modelo de Penman-Monteith, ou seja, os dados disponíveis sendo as temperaturas máxima e mínima do ar, insolação e velocidade do vento, não altera substancialmente a precisão da estimativa da evapotranspiração. Sendo, entretanto, as opções 4 ou 5 as mais recomendadas, em razão do menor número de parametrizações utilizadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G.; Jensen, M.E.; Wright, J.L. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, n.4, p. 650-662, 1989.
- Allen, R.G.; Smith, M.; Pereira, L.S.; *et al.* An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, New Delhi, v. 43, n. 2, p. 35-90, 1994a.
- Allen, R.G.; Smith, M.; Perier, A.; *et al.* An Update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, New Delhi, v. 43 n. 2, p. 1-31, 1994b.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 56*, Roma, Itália, 1998, 300p.
- Bernardo, S. Manual de Irrigaçãol. 4. ed. Viçosa, UFV, Impr. Univ., 1986. 488p.
- Boss, M.G.; Vos, J.; Feddes, R. A Criwar 2.0: A simulation model crop irrigation water requirement. Wageningen: ILRI, 1996, 117p. (ILRI Publication, 46).
- Chiew, F.H.S.; Kamaladasa, N.N.; Malano, H.M.; *et al.* Penman-Monteith, FAO-24 reference

- crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 9-21, 1995.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. Roma: FAO, 1977, 198p. (Irrigation & Drainage paper 24).
- Fao (Roma, Itália). CROPWAT: Programa de ordenador para planificar y manejar el riego. Roma, 1993 (Estudio FAO Riego y Drenage, 46).
- Ferreira, M.I.; Valancogne, C.; Daudet, F.A; *et al.* Evapotranspiration and crop-water relations in a peach orchard. In: Evapotranspiration and irrigation scheduling, Proceedings of the International Conference, American Society of Agricultural Engineers the Irrigation Association, november, 3-6, San Antonio, Texas, p. 61-68, 1996.
- Fox Jr., F.A; Scherer, T.; Slack, D.C.; Clark, L.J. Arizona irrigation scheduling - AZSCHED 1.01 - Users manual. The University of Arizona - Cooperative Extension - Agricultural and Biosystems Engineering.
- George, B.A; Shende, S.A.; Raghuwanshi, N.S. Development and testing of an irrigation scheduling model. *Agricultural Water Management*, v.46, p.121-136, 200.
- Gomide, R.L. Monitoramento para manejo de irrigação: Instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M.S.; SILVA, É.L.; VILELA, L.A.A.; SILVA, A.M. (ed.). Manejo de irrigação. Poços de Caldas: DE/UFLA, 1998. Cap 2, p.133-238.
- Hargreaves, G. H. Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Trans. ASAE*, 174, v. 17, p.701-704, 1974.
- Jensen, D.T.; Hargreaves, G.H.; B. Temesgen, B.; *et al.* Computation of ET_0 under nonideal conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 123, n.5, p. 394-399, 1997.
- Jensen, M.E.; Haise, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *J. Irrig. Drainage Div. ASCE*, v. 89, p.15-41, 1963.

- Klar, A.V. Irrigação frequência e quantidade de aplicação. 1. Ed. São Paulo: Nobel Editora, 339p. 1991.
- Linacre, E.T. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. *Agric. Meteorology*, v.18, p.409-424, 1977.
- Makkink, G.F. Ekzamenno de la formula de Penman. *Neth. J. Agric. Sci*, v.5, p.290-305, 1957.
- Moreira, H.J.C. Sistema agroclimatológico para o acompanhamento das culturas irrigadas: manual prático para o manejo da irrigação. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 90p, 1993.
- Michalopoulou, H.; Papaioannou, G. Reference crop evapotranspiration over Greece. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 20, p. 209-221, 1991.
- Naoum, S.; Tsanis, I.K. Hydroinformatics in evapotranspiration estimation. *Environmental Modelling & Software*, Oxford, v.1, n.18, p. 261-271, 2003.
- Ortega-Farias, S.O.; Cuenca, R.H.; English, M.; *et al.* Hourly grass evapotranspiration in modified maritime environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 121, n. 6, p. 369-373, 1995.
- Papakyriakou, T.N.; McCaughey, J.H. An evaluation of the water balance technique for the estimation of evapotranspiration for a mixed forest. *Canadian Journal of Forest Research*, v.21, n.11, p. 1622-1631, 1991.
- Priestley, C.H.B.; Taylor, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Ver.*, Washington, v.100, p.81-92, 1972.
- Rosenberg, N.J.; Blad, B.L.; Verma, S.B. *Microclimate: The biological environment* 2nd Edition, Lincoln – Nebraska: John Wiley & Sons, 1983, 495p.
- Sentelhas, P.C. Evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática. Piracicaba: ESALQ/USP, 1998, 95p. Tese Doutorado

- Silva, V.P.R. Estimativa das necessidades hídricas da mangueira. Campina Grande: CDRN/UFCG, 2000, 129p. Tese Doutorado
- Silva, V. P. R.; Dantas, R. T.; Campos, J. H. B. C.; Guedes, M. J. F. Estimativa da evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman-Monteith - FAO/56, Hargreaves e Tanque Classe A em períodos diários e mensais In. XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia e III Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia, Fortaleza – CE, Santa Maria – RS. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001, v. 2, n. 2, p. 467-468.
- Silva, V.P.R; Belo Filho, A.F.; Campos, J.H.B.C.; Dantas, R.T. Sistema de estimativa e monitoramento da evapotranspiração de referência-SIEN-ETo In. Congresso Brasileiro de Meteorologia , 12, 2002, Foz de Iguaçu. Anais... Piracicaba: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002, p. 2235-2241.
- Smith, M.; Allen, R. G.; Pereira, L. Revised FAO methodology for crop water requirements. In: Evapotranspiration and irrigation scheduling, Proceedings of the International Conference, American Society of Agricultural Engineers the Irrigation Association, november, 3-6, San Antonio, Texas, p. 116 - 123, 1996.
- Viswanadham, Y.; Silva Filho, V.P.; Andre, R.G.B. The Priestley-Taylor parameter α for the Amazon forest. Forest Ecology Management, Amsterdam, v.38, p.211-225, 1991.
- Withers, B.; Vipond, S. Irrigação: projeto e prática. 3. ed. São Paulo: Nobel Editora, 1988. 339p.