



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL

COMPARAÇÃO DE EQUAÇÕES QUE ESTIMAM A
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) COM O MODELO
DE PENMAN-MONTEITH PADRÃO FAO NAS CONDIÇÕES DO
MUNICÍPIO DE AREIA-PB

ÉDEN CÉSAR SILVA MARINHO

AREIA - PB

ABRIL/2013

ÉDEN CÉSAR SILVA MARINHO

**COMPARAÇÃO DE EQUAÇÕES QUE ESTIMAM A
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (E_{T0}) COM O MODELO
DE PENMAN-MONTEITH PADRÃO FAO NAS CONDIÇÕES DE
AREIA-PB**

Trabalho de Graduação apresentado à
Universidade Federal da Paraíba, como
parte das exigências do Curso de
Agronomia para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Ferreira da Costa Filho

AREIA - PB

ABRIL – 2013

Ficha Catalográfica Elaborada na Seção de Processos Técnicos da
Biblioteca Setorial do CCA, UFPB, campus II, Areia - PB

M338c *Marinho, Éden César Silva.*

Comparação de equações que estimam a evapotranspiração de referência (ET_o) com o modelo de Penman-Monteith padrão FAO nas condições do município de Areia-PB. / Éden César Silva Marinho. - Areia: UFPB/CCA, 2013. 42 f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2013.

Bibliografia.

Orientador (a): José Ferreira da Costa Filho.

1. Evapotranspiração de referência 2. Temperatura 3. Precipitação pluvial I. Costa Filho, José Ferreira da (Orientador) II. Título.

UFPB/CCA

CDU: 551.573

ÉDEN CÉSAR SILVA MARINHO

APROVADA: 19/04/2013.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Ferreira da Costa Filho
-Orientador-

Prof. Dr. Maurício Javier de León
Examinador

M.Sc. Talita Stephanie Alves da Costa
Examinadora

AREIA - PB

ABRIL/2013

A vida não é decidida nos grandes passos, mas sim nos minúsculos detalhes que encontramos ao longo dela, pois nada é por acaso, é providência de Deus, você age e ele intercepta, ou ele intercepta e você age.

ESSA MONOGRAFIA É DEDICADA...

Á Deus, porque foi ele quem me deu forças espirituais para que o meu corpo não fraquejasse nos momentos mais difíceis, e que não foram poucos, fazendo com que eu sempre mantivesse a calma e a esperança que no final tudo ia dá certo, e que meu esforço seria bastante recompensado.

Aos meus pais, pois foi deles de quem tive uma excelente educação e condições psicológicas para que aturasse as adversidades da vida juvenina, sem que me desviasse do foco, além de sempre me estimularem para que minhas metas sempre fossem alcançadas me ajudando sempre que possível, e mesmo nos momentos mais complicados da minha vida nunca mediram esforços para que eu superasse os obstáculos.

Ao meu Avô, Emídio da Silva, que sempre me acolheu aos sábados para que almoçássemos juntos, e que por conta do curso muitas vezes não pude está sentado à mesa com o mesmo.

Ao meu Avô, Antônio Marinho de França, e minha Tia Beliza Elídia Marinho, além de minhas avós Rita Tinina Jó Silva e Maria César Marinho (Todos In Memoriam). Embora que eles não estejam mais presentes entre nós, sempre foi do agrado deles que eu estudasse, e por entanto sempre tiveram o meu carinho, autoestima e grandiosa consideração.

AGRADECIMENTOS

Ao meu bom Deus...

Pois ele é o nosso pai, e a quem devemos sempre agradecer pelas vitórias alcançadas em nossas vidas, nada é coincidência e sim tudo providência de Deus, se hoje eu estou aqui registrando esse agradecimento é porque ele permitiu e me deu forças para superar os desafios impostos a minha vida, fazendo com que praticasse o meu amadurecimento dentro da vida acadêmica, contribuindo assim para que eu seja uma pessoa cada vez melhor.

Aos meus pais...

Antônio José Edson César Marinho e Maria Jó da Silva César Marinho. Exemplo de pais e casal, sempre me passaram a confiança e o conforto para que eu pudesse me dedicar aos meus estudos, me incentivaram, me acompanharam, lutaram para que eu pudesse chegar longe.

As minhas Tias...

Sempre me instigando ao conhecimento, aos estudos, a formação pessoal e profissional, me ajudando nos momentos mais difíceis para que meu caminho não fosse interrompido. A elas o meu enorme carinho, pois sempre acreditaram em mim.

Aos meus Irmãos...

Jefferson César Silva Marinho e Álvaro César Silva Marinho por me apoiarem nos momentos em que precisei e que me ajudaram sempre, além de torcerem por mim.

A Elizabeth Szilassy...

Agrônoma, exemplo profissional, defensora do meio ambiente e do agricultor familiar, à qual devo minha inspiração na decisão de me tornar um Engenheiro Agrônomo.

Ao meu orientador...

Professor Dr. José Ferreira da Costa Filho, ao qual é difícil encontrar palavras para agradecer do mesmo nível em que se deve a sua importância para mim, na minha vida acadêmica. A ele agradeço pelos bons momentos de alegria, pela enorme compreensão e atenção dedicada a minha pessoa, pelo exemplo de professor e orientador, pela paciência comigo em momentos que estive ausente, pela sua amizade. Enfim, por ser peça fundamental na minha caminhada e alcance dos meus objetivos acadêmicos.

À Banca Examinadora...

Ao Prof. Dr. Maurício Javier de León pela honrosa participação na minha avaliação e contribuição nas correções finais e a Mestranda Talita Stephanie Alves da Costa pela

contribuição na realização e correção desse trabalho, além da estima amizade da qual ganhei bons momentos de alegria.

Ao meu Avô, Tios, Primos, e Primas...

Pelas demonstrações de carinho e apoio ao longo desta caminhada e pela compreensão em tolerar a minha ausência em alguns momentos.

A minha namorada...

Izabel Cristiane Izídio de Oliveira, a qual faz parte do meu estímulo para que concluísse esse curso, pela sua admiração na minha determinação, pela vontade de sempre me ajudar sem medir esforços, e pela confiança depositada em mim que no final tudo ia (vai) dá certo. Aos seus pais, Francisco e Solidade, pela confiança depositada em mim.

A minha Amiga/Irmã...

Josebel dos Santos Gomes, seu irmão Altieres Santos Gomes e sua mãe Maria Tavares dos Santos Gomes, por sua torcida calorosa e apoio na minha caminhada acadêmica e pessoal, me passando confiança e pelas suas orações por minha pessoa.

Aos amigos que fiz durante essa caminhada...

Leonardo, conterrâneo e amigo de longas datas, Arivaldo e Ronaldo, antigos amigos, Allan, Flaviano, Renato, Bernardo, Pablo, Gabriel, João Quintans, João Belarmino, Plácido, Antônio Fernando, Antônio Augusto, Marcolino, Gabriel, Anderson, Antônio Lucena, Fernando Luiz, Ícaro, Cassiano. Aos meus amigos e companheiros de quarto, Henrique, Wylde e Sérgio, que estarão sempre guardados em minha memória, pelas horas de irmandade e conquistas enfrentadas por nós. Aos meus companheiros do bloco “C”, pelos momentos de alegria que tivemos todos juntos.

Aos professores...

Pela dedicação e disponibilidade demonstrada durante este curso, enriquecendo-me com conhecimento pleno para minha vida profissional como também pessoal.

A todos os funcionários do CCA...

Que desde o primeiro momento em que estive aqui, sempre que puderam me ajudaram de forma digna e calorosa.

Agradeço também aos meus colegas de classe em geral, até aqueles que por ventura não terminaram o curso conosco.

E a todos e todas que participaram comigo de alguma forma para que no final tudo desse certo.

O MEU MUITO OBRIGADO

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE EQUAÇÕES	XI
RESUMO.....	XII
ABSTRACT	XIII
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS.....	2
2.1 - Geral.....	2
2.2 - Específicos	2
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	3
3.3 - Penman-Monteith.....	6
3.4 - Priestley-Taylor	8
3.5 - Blaney-Criddle.....	9
3.6 - Hargreaves e Samani	9
4 - MATERIAL E MÉTODOS.....	11
4.1 - Área de Estudo	11
4.2 - Dados Meteorológicos	11
4.3 - Modelo de Penman-Monteith Padrão FAO	11
4.4 - Tanque Classe “A”	12
4.5 - Equação de Priestley-Taylor	13
4.6 - Método de Blaney-Criddle	13
4.7 - Hargreaves e Samani	14
5 - PROGRAMA REF-ET (REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION CALCULATOR)	16
6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
7 - CONCLUSÕES	24
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Características do Cultivo de Referência.....	04
Figura 2. Tanque Classe “A”	06
Figura 3. Programa REF-ET (Reference Evapotranspiration Calculator).....	16
Figura 4. Programa REF-ET (Reference Evapotranspiration Calculator).....	17
Figura 5. Equações para a determinação da estimativa da evapotranspiração de referência (ET _o), através do programa.....	17
Figura 6. Evapotranspiração de referência - ET _o (mm), estimada pelo método de Blaney & Criddle (BC) comparada a (ET _o) determinada pelo modelo Penman-Monteith-Padrão FAO, médias mensais correspondente a série 1998-2007.....	20
Figura 7. Evapotranspiração de referência - ET _o (mm), estimada pelo método de Priestley-Taylor (PT), comparada a (ET _o) determinada pelo modelo Penman-Monteith-Padrão FAO, médias mensais correspondente a série 1998-2007.....	21
Figura 8. Evapotranspiração de referência - ET _o (mm), estimada pelo método de Hargreaves & Samani (HS), comparada a (ET _o) determinada pelo modelo Penman-Monteith-Padrão FAO, médias mensais correspondente a série 1998-2007.....	21
Figura 9. Evapotranspiração de referência - ET _o (mm), estimada pelo método de Tanque Classe “A” (Cl “A”), comparada a (ET _o) determinada pelo modelo Penman-Monteith-Padrão FAO, médias mensais correspondente a série 1998-2007.....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fator (p) do método de Blaney e Criddle, em função da latitude e da época do ano.....	14
Tabela 2. Valores dos coeficientes de desempenho.....	18
Tabela 3. Valores diários médios mensais de evapotranspiração de referência calculada pelos métodos do <i>Penman-Monteith</i> , <i>Blaney & Criddle</i> , <i>Hargreaves & Samani</i> , <i>Priestley-Taylor</i> e <i>Tanque Classe “A”</i> em milímetros da série 1998 – 2007.....	19
Tabela 4. Valores dos coeficientes <i>a</i> , <i>b</i> , e de determinação R^2 da reta de regressão e do erro médio absoluto (<i>EMA</i>), para as equações de Blaney & Criddle, Hargreaves & Samani, Priestley-Taylor e Tanque Classe “A” em Areia-PB (1998-2007).....	23
Tabela 5. Valores dos coeficientes <i>r</i> , <i>d</i> , e <i>c</i> (produto de <i>r</i> e <i>d</i>), além do erro médio absoluto (<i>EMA</i>), para as equações de Blaney & Criddle, Hargreaves & Samani, Priestley-Taylor e Tanque Classe “A” em Areia-PB.....	23

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Evapotranspiração de referência do Tanque Classe “A”	05
Equação 2. Evapotranspiração de referência do modelo Penman Monteith.....	11
Equação 3. Evapotranspiração de referência do Tanque Classe “A”	12
Equação 4. Cálculo do coeficiente Kp do tanque Classe “A”.....	12
Equação 5. Cálculo da evapotranspiração de referência de Priestley Taylor.....	13
Equação 6. Cálculo do fator de ponderação de Priestley Taylor.....	13
Equação 7. Cálculo do fator de ponderação de Priestley Taylor.....	13
Equação 8. Cálculo da evapotranspiração de referência de Blaney & Criddle.....	13
Equação 9. Cálculo da temperatura média.....	13
Equação 10. Cálculo da evapotranspiração de referência de Hargreaves & Samani.....	14
Equação 11. Equação definida de Hargreaves & Samani.....	14
Equação 12. Cálculo da distância relativa Terra-Sol.....	15
Equação 13. Cálculo da radiação solar extraterrestre (Ra).....	15
Equação 14. Cálculo da declinação solar.....	15
Equação 15. Cálculo de o ângulo horário Pôr do Sol.....	15
Equação 16. Cálculo do coeficiente de análise “c”.....	18
Equação 17. Cálculo do índice de concordância.....	18
Equação 18. Cálculo do Erro Médio Absoluto.....	19
Equação 19. Cálculo do Erro Máximo.....	19

RESUMO

O objetivo principal desse trabalho foi comparar a evapotranspiração de referência (ET_o), estimada pelos métodos de Blaney & Criddle, Priestley-Taylor, Hargreaves & Samani e pelo Tanque Classe “A”, com a ET_o estimada pelo modelo Penman-Monteith Padrão FAO, nas condições de Areia-PB. Para se alcançar esse objetivo, dados meteorológicos diários médios mensais da temperatura máxima, média e mínima do ar, umidade relativa, vento, precipitação pluviométrica e insolação, da série 1998-2007, obtidos na Estação Meteorológica do CCA/UFPB, foram processados e analisados para o cálculo da ET_o e demais variáveis. Usou-se para a estimativa da evapotranspiração de referência o programa Reference Evapotranspiration Calculator (Ref-ET). A ET_o estimada por todos os métodos estudados, com exceção do modelo de Blaney & Criddle, superestimaram a ET_o determinada pelo modelo padrão de Penman-Monteith, recomendado pela FAO para calibração de outros métodos. O coeficiente de determinação (R^2) de todos os modelos analisados foi superior a 0,90, com destaque para o método de Priestley & Taylor cujo coeficiente de determinação foi 0.9806. Ao se comparar as equações estudadas calculando-se o índice “c” de Willmott, o erro médio absoluto (EMA) e o erro máximo (EM), observou-se que a metodologia de Blaney & Criddle foi a que apresentou o melhor desempenho com o índice $c = 0,89$, considerado muito bom, seguido pelo Tanque Classe “A” com $c = 0,62$, Hargreaves & Samani com $c = 0,60$ e Priestley-Taylor com $c = 0,55$, classificados com desempenho mediano.

Palavras-chaves: evapotranspiração de referência, temperatura e precipitação pluvial.

ABSTRACT

The main objective of this study was to compare the reference evapotranspiration (ET_o), estimated by the Blaney & Criddle, Priestley-Taylor, Hargreaves & Samani and the class "A" Tank equations, with those estimated by the Standard FAO Penman-Monteith model in Areia-PB conditions. To achieve this goal, average monthly weather data of the maximum, average and minimum air temperatures, relative humidity, wind, precipitation and sunshine, series 1998-2007, obtained from the meteorological station of the CCA / UFPB were processed and analyzed for the calculation of ET_o and other variables. It used to estimate reference evapotranspiration the program Reference Evapotranspiration Calculator (Ref-ET). The ET_o estimated by all methods studied, except for the model Blaney & Criddle, overestimated ET_o determined by the standard model of Penman-Monteith-FAO, recommended for calibration of the other methods. The coefficient of determination (R^2) of all models analyzed was higher than 0.90, with emphasis on the method of Priestley & Taylor. This model had a coefficient of determination of 0.9806. Comparing the equations studied by calculating the index "c" of Willmott, mean absolute error (MPE) and maximum error (ME), it was observed that the methodology of Blaney & Criddle showed the best performance with the index $c = 0.89$, which is considered very good, followed by Class "A" Tank with $c = 0.62$, Hargreaves & Samani with $c = 0.60$ and Priestley-Taylor with $c = 0.55$, ranked with average performance.

Keywords: evapotranspiration reference, temperature and precipitation.

1- INTRODUÇÃO

Em geral, para se determinar as possibilidades de limitações climáticas na agricultura se buscam séries históricas de precipitação pluviométrica e sua distribuição no tempo e espaço a fim de se avaliar sua potencialidade para o desenvolvimento dos cultivos. É importante salientar que a precipitação representa apenas uma das fases do balanço hídrico. Considerando o Ciclo Hidrológico, a precipitação nada mais é do que o retorno da água na forma líquida ou sólida, da atmosfera para a superfície terrestre. A outra fase, de igual importância, é o consumo de água através do processo de evaporação do solo e de transpiração da planta, ou seja, a evapotranspiração.

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes da equação do balanço hídrico. A sua estimativa através de modelos, formas empíricas e determinação direta pelos “lísímetros” é fator fundamental no planejamento do uso da água em sistemas agrícolas e no gerenciamento dos recursos hídricos. Existem diversas maneiras de se medir a evapotranspiração, mas devido aos altos custos dos equipamentos, tais técnicas quase sempre se restringem à pesquisa (PEREIRA et al., 1997A).

Apesar da existência de diversos modelos para se estimar a ET, esses modelos, no entanto, são utilizados em condições climáticas e agronômicas muito diferentes daquelas em que inicialmente foram concebidos, Doorenbos & Pruitt (1977) e, por isso, é de extrema importância avaliar o grau de exatidão desses modelos, antes de utilizá-los para nova condição.

Na ausência de equipamentos de medidas de evapotranspiração da cultura, os pesquisadores, muitas vezes, lançam mão de estimativas baseadas na evapotranspiração de referência (ET_o) e no coeficiente de cultura (K_c). A ET_o se refere a uma cultura hipotética (similar a um gramado), mantida sob condições ideais de crescimento, podendo ser determinada por equações, desde as mais simples, Blaney-Criddle (1975), como as baseadas na temperatura, Hargreaves & Samani (1985), até as mais complexas, que envolvem o balanço de energia ao nível das plantas, (PENMAN-MONTEITH ,1965), e PRIESTLEY-TAYLOR ,1972) .

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), consideram o método de Penman-Monteith como padrão de estimativas da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos Allen et al. (1998), sendo utilizado também para avaliar outros métodos (SMITH, 1991).

2- OBJETIVOS

2.1 – Geral

- Comparação da evapotranspiração em Areia-PB, através do Tanque Classe “A”, da equação de Priestley-Taylor, Blaney-Criddle, Hargreaves e Samani e do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO.

2.2 – Específicos

- Estimar a evapotranspiração em Areia-PB, através do Tanque Classe “A”, da equação de Priestley-Taylor, Blaney-Criddle, Hargreaves e Samani e do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO.
- Determinar qual dos modelos estudados estima melhor a ETo determinada pelo modelo Penman-Monteith padrão FAO, nas condições de Areia-PB.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Evapotranspiração

A evapotranspiração é um termo bastante estudado devido a sua importância, qual seja a estimativa do consumo de água pelas plantas. É a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor, tendo papel importantíssimo no Ciclo Hidrológico em termos globais. Esse processo envolve a evaporação da água de superfícies de água livre (rios, lagos, represas, oceano, etc), dos solos e da vegetação úmida (que foi interceptada durante uma chuva, ou irrigação) e a transpiração dos vegetais.

A primeira citação foi efetuada por Thornthwaite (1948), citado por vários autores entre eles Medeiros (1996). Para Thornthwaite (1948), o fenômeno chamado de evapotranspiração potencial, é considerado como: a perda máxima de água em uma superfície de solo bem umedecido, completamente coberta com vegetação, em fase de desenvolvimento ativo e com dimensões suficientemente grandes, de modo a minimizar os efeitos de energia advectiva local. Se algumas dessas condições não forem atendidas, tem-se a evapotranspiração real. Quase que simultaneamente, Penman (1948), na Inglaterra, também definiu a evapotranspiração potencial (ETP), ressaltando que a vegetação deveria ser rasteira e com altura uniforme. De um modo geral, a grama foi tomada como padrão, em razão da sua utilização nos postos meteorológicos (PEREIRA et al., 1997A).

Outra definição muito citada por estudiosos do assunto é a de Penman (1948), em que o autor define evapotranspiração potencial como o processo de transferência d'água para a atmosfera, na unidade de tempo, de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, de porte baixo, em pleno desenvolvimento e sem restrição de água no solo.

Essa definição foi muito utilizada até que surgiu a necessidade de um conceito mais geral para o termo evapotranspiração, dada as diferenças entre as culturas utilizadas, mesmo se tratando de variedades de grama, no conceito da referida variável.

Surgiu então a definição de evapotranspiração de referência (ET_o). Desse modo ET_o foi definida no Boletim 24 da FAO como: “taxa de evapotranspiração para uma extensa superfície, com cobertura gramada de altura uniforme, entre 8 e 15cm, em crescimento ativo, com o solo completamente sombreado e sem déficit de água Doorenbos & Pruitt (1977); Jensen et al (1990) e Al-Ghobari (2000), para grama de referência rebaixada através de cortes.

Recentemente, Allen et al. (1994 a e b), atualizaram a definição da evapotranspiração de referência (ET_o) e o procedimento de cálculo da referida variável, devido principalmente, à diversidade de gramas consideradas na definição da cultura de referência.

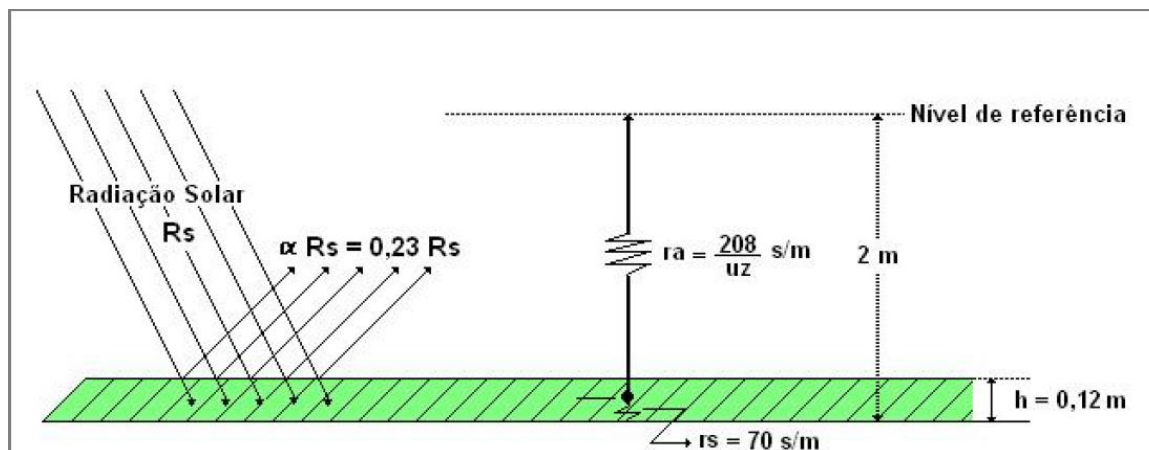


Figura 1 – Características do cultivo de referência. Adaptado de Allen et al. (1998)

A última publicação da FAO, o Boletim 56, Allen et al. (1998), novamente atualiza os procedimentos de cálculo de evapotranspiração de referência (ET_o), analisa aspectos relacionados à determinação do coeficiente das culturas (K_c) e recomenda procedimentos de avaliação dos dados empregados nas estimativas de ET_o.

Entre os conceitos de evapotranspiração, ainda se pode estimar a evapotranspiração real (ET_r) que constitui a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e de cobertura, a Evapotranspiração de Oásis (ET_o), que é a evapotranspiração de uma área vegetada úmida irrigada que é circundada por uma extensa área seca, de onde provém energia por advecção (calor sensível, H'), a qual aumenta a quantidade de energia disponível para a ET. A Evapotranspiração de Cultura (ET_c), é a evapotranspiração de uma cultura em dada fase de seu desenvolvimento, sem restrição hídrica, em condições mínimas de crescimento e com ampla área de bordadura para evitar a advecção de calor sensível (H) de áreas adjacentes.

3.2 - Tanque Classe “A”

Para quantificar a água evaporada em ambiente aberto é utilizado atualmente como equipamento padrão, segundo a Organização Meteorológica Mundial – OMM, um aparelho denominado “Tanque Classe ‘A’” ou “Tanque Evaporimétrico”. Estima-se que a evaporação das grandes superfícies hídricas tenha correspondência de aproximadamente

70% a 75% do valor obtido no Tanque Classe “A”. Este aparelho adotado como referência pela OMM foi desenvolvido pelo Departamento de Meteorologia dos EUA. Ele é construído em chapa de aço galvanizado ou inox, com coloração branca ou clara, cilíndrico, com cerca de 1.200 mm de diâmetro e 250 mm de profundidade.

Para a medição da evaporação, enche-se o tanque com água até 50 mm da borda, sendo que o mesmo deve ser instalado sobre uma plataforma de madeira de modo que a superfície da água fique a 300 mm do chão.

Devido a sua área relativamente pequena, da absorção da radiação pelas paredes do recipiente e pelo fato dele criar seu próprio ambiente aerodinâmico ao ficar exposto acima do solo obtêm-se valores de evaporação às vezes um pouco exagerado.

O tanque "classe A", por exemplo, montado elevado cerca de 40 cm de altura evaporou 1.081 mm em um ano. O mesmo tanque enterrado, com a superfície evaporante ao nível do solo, evaporou apenas 834 mm, 23% a menos. Um tanque mais elevado ainda, a 107 cm de altura e com diâmetro menor, de 60 cm, evaporou bem mais, 1.196 mm.

Outro tanque enterrado, com diâmetro relativamente grande, de 180 cm, evaporou apenas 795 mm, ou 33,5% a menos. A maior evaporação nos tanques elevados se deve, certamente, à grande exposição de suas paredes à radiação solar e ao vento. Em área seca, esse fenômeno acontece porque o tanque "Classe A" localizado fora da cultura irrigada, sem proteção da faixa-tampão e montado elevado em relação ao solo, superexposto, torna-se sujeito às advecções locais e regionais, apresentando resultados superestimados. Com o tanque enterrado e a superfície da água no mesmo nível da grama externa, os resultados foram melhores, próximos da verdadeira evapotranspiração potencial.

Na ausência de dados meteorológicos a evaporação do tanque “Classe A” é amplamente utilizada para se estimar a evapotranspiração de referência, através de um coeficiente empírico que relaciona a evaporação do tanque com a evapotranspiração de referência, segundo a expressão abaixo, (DOORENBOS & PRUITT, 1977):

$$ET_o = K_p \cdot E_v \quad (1)$$

Em que: ET_o – é a evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ; e a variável K_p – é o coeficiente de conversão da evaporação do tanque “Classe A”, que se estima em função da velocidade do vento e da umidade relativa do ar, e da área de exposição vegetal relativa ao tanque, E_v – é a lâmina da evaporação do tanque Classe A, mm d^{-1} .

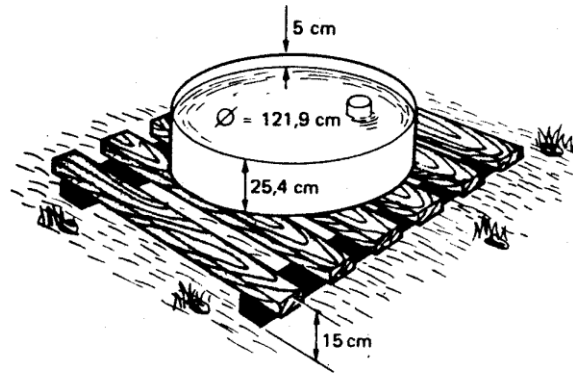


Figura 2-Tanque Classe “A” e suas medidas.

Na escolha de um método para determinação da evapotranspiração, deve-se levar em consideração a praticidade e a precisão, pois, apesar desses métodos teóricos e micrometeorológicos se basearem em princípios físicos, eles apresentam limitações, principalmente quanto à instrumentação, o que pode restringir suas utilizações (BERLATO & MOLION, 1981).

3.3- Penman-Monteith

Durante uma década, a FAO (Food and Agriculture Organization) adotou 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. A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), consideram o método de Penman-Monteith (PM) como padrão de cálculo da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos Smith, (1991); Allen et al. (1998). O método de Penman-Monteith foi o que melhor se ajustou às medições diárias e mensais da ETo, e envolvem o balanço de energia ao nível das plantas.

Geralmente existem camadas turbulentas e complexas, dentro e acima das coberturas vegetais. Os efeitos da divisão de energia dentro da cobertura vegetal pode ser explicado por meio de simples resistência. Esse fato é geralmente explicado, na teoria da “big leaf” Monteith (1965 e 1985), onde as resistências (da cobertura e aerodinâmica) operam em série entre o interior das folhas e alguma altura de referência, situada acima da vegetação (ALLEN et al., 1994a).

Segundo Peres (1994), Penman desenvolveu sua equação incorporando a velocidade do vento, relacionando-a a superfície de água livre, a partir de duas premissas: primeiro, que as fontes e sumidouros de calor sensível ocorrem em um mesmo plano, por exemplo, a lâmina de uma folha; segundo, que a pressão de vapor da superfície evaporante, seja igual à pressão de vapor de saturação da água a temperatura da superfície (relacionada ao calor latente).

Este método, que tem sido amplamente utilizado em todo o mundo Silva (2004; Silva et al., (2005); Borges & Mendingo (2007), foi estabelecido para uma cultura hipotética com as seguintes características: resistência estomática de 70 s m⁻¹, altura da cultura hipotética fixada em 0,12 m e albedo de 23% (ALLEN et al., 1998).

Penman (1948), portanto não incluiu a função de resistência à transferência de vapor d'água em sua equação original. A equação, combinada com o termo aerodinâmico e resistência da superfície de uma cobertura vegetal, é chamada de equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1985).

Conforme Peres (1994), o modelo de Penman-Monteith (PM) torna-se semelhante ao de Penman (1963), quando a resistência à troca de calor sensível e latente a partir do interior da folha (r_c), é igual a zero ($r_c = 0$ sm⁻¹), e substitui-se a função de velocidade do vento pelo inverso da resistência aerodinâmica (r_a). Com o modelo assim proposto, torna-se possível estimar a evaporação de uma superfície de água livre, o que é diferente de evapotranspiração das culturas, a qual apresenta um valor mínimo de r_c diferente de zero.

Equações de resistência aerodinâmica (r_a) e resistência total da superfície (r_s), são combinadas com o método de PM, para formar uma equação mais simples, descrevendo a grama hipotética de referência. Pela combinação de expressões generalizadas de densidade do ar, com expressões simplificadas de r_s e r_a para a grama, Allen et al. (1989); Smith (1991); Allen et al. (1994a); e Allen et al. (1998), parametrizaram a chamada equação de Penman-Monteith FAO (PM-FAO).

A FAO através de seus consultores Smith, (1991), recomendam que os métodos empíricos de estimativa de ETo, sejam calibrados e validados para outras regiões. Essa aplicação deve ser feita para locais próximos que tenham medidas climáticas suficientes.

Al-Ghobari (2000) relatou que a maioria das equações desenvolvidas não são universalmente aplicadas, sem as modificações ou calibração locais, para toda situação de cultura ou condição climática, especialmente em clima seco e quente.

Allen et al. (1998) relatam que estudos realizados nos EUA e na Europa, confirmam a precisão e consistência do método de PM, para climas úmidos e áridos.

Vários autores encontraram boa correlação entre dados medidos em lisímetros e estimados pela equação de Penman-Monteith como: (ALLEN ,1986; MAGGIOTTO 1996; SENTELHAS ,1998; PEREIRA ,1998; CAMARGO E SENTELHAS ,1997; JENSEN et al. 1990; RIBEIRO ,1996; HUSSEIN ,1999; ALLEN et al. 1994a e AZEVEDO 1999).

Para Baselga & Allen (1996) a equação de PM tem provado ser altamente sensível às variações no nível de umidade no solo e altura da cultura de referência, quando usando essas duas variáveis para estimativa da resistência da cobertura vegetal e aerodinâmica.

Resultados de trabalho indicaram que os valores de ETo obtidos pelo método de Priestley-Taylor subestimam os valores em relação à equação de Penman-Monteith durante os meses de inverno, nas áreas central e sudoeste e os superestimam nas áreas costeiras e montanhosas dos EUA.

Os métodos para a estimativa da ETo são baseados em uma ou mais variáveis atmosféricas, tais como temperatura do ar, radiação solar e umidade relativa, e até mesmo em medições relacionadas com a própria variável (evaporação do tanque “Classe A”). Como o método de Penman- Monteith requer o maior número de variáveis atmosféricas na sua formulação, que muitas vezes não estão disponíveis em condições reais de manejo das culturas, alguns estudos têm sido desenvolvidos visando comparar outros métodos com o modelo padrão estabelecidos pela FAO e dados experimentais em regiões específicas (BORGES & MENDIONDO, 2007; SULEIMAN & HOOGENBOOM, 2007).

3.4 – Priestley-Taylor

Como outra opção de equações de estimativa de evapotranspiração de referência, será utilizada a equação de Priestley-Taylor (PT). A equação de (PT) é uma simplificação da equação de Penman original, onde somente é contemplado o termo energético, corrigido por um coeficiente de ajuste (α), cujo valor no modelo original é de (1,26), Pereira et al., (1997B). Segundo Peres et al. (1997), Priestley-Taylor estabeleceram empiricamente que a relação evaporação/evapotranspiração potencial de uma superfície saturada, com mínima advecção, pode ser estimada pela equação de Priestley-Taylor que encontraram valores de α variando de 1,08 (evaporação em solo nú), 1,32 (evapotranspiração em solo vegetado) com valor médio de 1,26.

Allen (1986) verificou que o método de Priestley-Taylor (PT) proporcionou bons resultados em climas onde a advecção é baixa. Entretanto, em climas áridos, onde a

advecção é mais elevada, PT subestimou ETo. O autor lembra que Priestley-Taylor, (1972), sugere o valor de $\alpha = 1,34$, como adequado para região árida da Austrália.

Pereira e Villa Nova (1992) mostraram que as variações do parâmetro de Priestley-Taylor, são descritas pelas flutuações de calor sensível (H). Os resultados mostram que a relação é linear e positiva, na base horária e diária. As relações encontradas indicam que o valor proposto por Priestley-Taylor (1972) ($\alpha = 1,26$), para condições potenciais não representa situação de advecção. Os autores encontraram valores de (α) que variam de 1,01 a 1,66.

3.5- Blaney-Criddle

Há um grande número de métodos teóricos para determinar a ETo. Muitos deles têm sido determinados e testados localmente. Se fórmulas locais estão disponíveis, devem ser utilizados. Se fórmulas locais não estão disponíveis, um dos métodos gerais teóricos deve ser usado.

Como já comentado aqui, o método mais utilizado é o método teórico de Penman modificado, que é descrito em detalhe na FAO Irrigação e drenagem do papel 24. Este método, contudo, é bastante rigoroso.

O método Blaney-Criddle é simples, utilizando dados de medição da temperatura. Deve notar-se, contudo, que este método pode não ser muito preciso, e pode proporcionar uma estimativa superficial ou "ordem de magnitude" apenas, mas especialmente sob "extremas" condições climáticas como em áreas secas, ventosas e de sol, a ETo que pode ser subestimado (até cerca de 60 por cento), enquanto em calma, áreas úmidas e nubladas, a ETo pode ser superestimado (até aproximadamente 40 por cento). Mas o método antigo de Blaney-Criddle data de 1950 e posteriormente foi melhorado e criado o Método de Blaney-Criddle, 1975.

3.6- Hargreaves e Samani

É um método empírico, desenvolvido para a região de clima seco. Baseia-se na temperatura média do ar e na amplitude térmica. Tem como vantagem a sua aplicabilidade em climas áridos e semi-áridos, como no nordeste do Brasil. A desvantagem é sua limitação de uso para tais condições, apresentando super-estimativa em climas úmidos.

Usando dados obtidos em lisímetros na região de Davis, Califórnia (clima semi-árido), com gramado, Hargreaves & Samani em 1985, propuseram a equação para estimativa de evapotranspiração de referência diária (mm d^{-1}) Pereira et al.(1997). É um método baseado na temperatura e na radiação solar. A equação de Hargreaves, modificada por Samani, onde o termo de correção, devido à umidade relativa do ar, foi excluído da equação original, teve como princípio o ajustamento dos índices da equação para as condições locais. O ajuste das constantes da equação foi realizado incorporando o termo de amplitude térmica média do mês, em ° C.

Contudo, baseado em equações de estudos anteriores Hargreaves E Samani (1985) desenvolveram uma equação simples que necessita apenas da temperatura do ar, e coeficientes dependentes da latitude do local e época do ano.

Esta equação (designada em diante por HS) tem produzido resultados satisfatórios ao ar livre em diversas partes de mundo, apesar da sua aparente simplicidade. Lopes Urra et al. (2006), compararam sete equações de E_{To} na região árida de sul de Espanha com dados de lisímetros e concluíram que a HS era a segunda melhor a seguir à PM.

Estudos anteriores têm demonstrado que o vento é uma fonte importante da variabilidade no valor da E_{to} , Martínez-Cob E Tejero-Juste, (2004); Jensen et al.(1997), e como a equação de Hargreaves não contabiliza o vento, diverge sensivelmente de cálculos realizados com a equação de Penman-Monteith.

4 – MATERIAL E MÉTODOS

4.1 – Área de Estudo

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Meteorologia do Departamento de solos e Engenharia Rural do CCA/UFPB em Areia-PB. Segundo a classificação de Koppen (1932) o clima da área é As', tropical úmido, com chuvas de outono-inverno. A temperatura média anual é de 24,5 °C, com umidade relativa média de 80% e precipitação pluvial média de 1400 mm. A estação meteorológica está localizada na Latitude -6° 58', Longitude 35° 41' W, com Altitude de 574 m.

4.2 – Dados Meteorológicos

Foram usados os dados meteorológicos diários médios mensais da temperatura média do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e evaporação do Tanque Classe "A", da série de anos (1998-2007), obtidas na Estação Meteorológica do Centro de Ciências Agrárias da UFPB, e usadas para obtenção da ET.

4.3 – Modelo de Penman-Monteith Padrão FAO

A equação de estimativa de evapotranspiração de cultivo de referência, proposta por Penman (1948), foi adotada e modificada por Monteith em 1965. Segundo Monteith e Unsworth (1990), a modificação da equação consiste na introdução de características da vegetação através dos conceitos de resistência da vegetação e a resistência aerodinâmica. Em termos gerais, a resistência da vegetação pode ser comparada ao grau de oposição da vegetação a perda de água em forma de vapor, a qual varia de acordo com o tipo de vegetação e sua fase de desenvolvimento. Por outro lado, a resistência aerodinâmica é a força que o ar necessita exercer para a difusão ou transporte de vapor e calor da superfície evaporante.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta (Rn-G) + \left(\frac{900 U_2}{T+237}\right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1+0,34 U_2)} \quad (2)$$

Em que:

ET_0 = é a evapotranspiração de referência diária (mm);

R_n = é o saldo diário de radiação ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$);

G = é o fluxo de calor no solo diário ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$);

T = é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$);

U_2 = é a velocidade do vento média diária a 2 m de altura ($m.s^{-1}$);

e_s = é a pressão da saturação do vapor média diária (kPa);

e_a = é a pressão atual de vapor média diária (kPa);

Δ = é a declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T_{med} ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$);

0,408 = corresponde a $1/\lambda$, sendo λ o calor latente de evaporação da água, igual a $2,45 MJ.Kg^{-1}$ a $20\ ^{\circ}C$;

900 = é um coeficiente para a cultura de referência ($KJ^{-1}.kg.K.d^{-1}$), que envolve os valores constantes da equação.

4.4 – Tanque Classe “A”

Para se obter as estimativas da ET_0 pelo método do Tanque Classe “A”, foi usada a equação seguinte:

$$ET_0 = K_p \times ECA \quad (3)$$

Em que:

ET_0 = evapotranspiração de referência (mm. d⁻¹);

K_p = coeficiente do tanque f (velocidade média do vento e umidade relativa)

ECA = evaporação do tanque classe A.

Para as condições de Areia, determinou-se o coeficiente K_p do tanque pela equação abaixo (ALLEN et al. 1998):

$$K_p = 0,61 + 0,00341.UR_{MÉD.} - 0,000162.U_2. UR_{MÉD.} - 0,00000959. U_2.FET + 0,00327. U_2.ln(FET) - 0,00289.U_2.ln(86,4.U_2) - 0,0106.ln(86,4. U_2).ln(FET) + 0,00063.(ln(FET))^2. ln(86,4. U_2) \quad (4)$$

Em que: U_2 é a velocidade do vento medido a 2,0 m de altura ($m\ s^{-1}$); $UR_{MÉD}$ é umidade relativa média do ar (%); FET é bordadura em metros (m) que corresponde a distância entre o tanque e o final da área de contorno na direção dos ventos dominantes, ln é o logaritmo neperiano.

4.5 – Equação de Priestley-Taylor

A evapotranspiração de referência (ET_o, em mm dia⁻¹) calculada pelo método Priestley & Taylor (1972) terá como parametrização a equação 5 a seguir:

$$ET_o = \alpha W(R_n - G) / \lambda \quad (5)$$

Em que: α é o parâmetro Priestley-Taylor; R_n é o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹); G é o fluxo de calor do solo (MJ m⁻² dia⁻¹); λ é o calor latente de evaporação (2,45 MJ kg⁻¹); W é o fator de ponderação dependente da temperatura do ar (T , em °C) e da constante psicrométrica, citado por Pereira et al. (2002):

$$W = 0,407 + 0,0145T \quad (0^\circ\text{C} < T \leq 16^\circ\text{C}) \quad (6)$$

$$W = 0,483 + 0,01T \quad (16^\circ\text{C} < T < 32^\circ\text{C}) \quad (7)$$

4.6- Método de Blaney-Criddle

O método Blaney-Criddle sempre se refere a valores médios mensais, tanto para a temperatura e a ET_o.

Assim, esse método utiliza temperatura média mensal e um fator ligado ao comprimento do dia.

$$ETP = (0,457 T + 8,13) p \quad (8)$$

Em que:

ETP = evapotranspiração potencial mensal (mm)

T = temperatura média anual (°C)

P = percentagem de horas diurnas do mês sobre o total de horas diurnas do ano

Se numa estação meteorológica local a mínima diária e as temperaturas máximas são medidas, a temperatura média do ar é calculada como se segue:

$$T_{med} = (T_{max} + T_{min}) / 2 \quad (9)$$

Para determinar o valor de (p), a Tabela 1 é utilizada. É essencial saber a latitude aproximada da área, o número de graus norte ou sul do equador.

Tabela 1. Fator (p) do método de Blaney e Criddle, em função da latitude e da época do ano. Adaptado de (DOOREMBOS & PRUITT ,1977).

Latitude	Norte	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	Sul	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
60°		0,15	0,25	0,26	0,32	0,38	0,41	0,40	0,34	0,28	0,22	0,17	0,13
55°		0,17	0,21	0,26	0,32	0,36	0,39	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,16
50°		0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,18
45°		0,20	0,23	0,27	0,30	0,34	0,35	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,20
40°		0,22	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
35°		0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,22
30°		0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23
25°		0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24
20°		0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25
15°		0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25
10°		0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26
05°		0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0°		0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,27	0,27	0,27

4.7 - Hargreaves e Samani

A equação de Hargreaves e Samani pode ser expressa da seguinte forma:

$$ET_o = 0,0135 K_T (T + 17,78) (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} R_a \quad (10)$$

Como normalmente K_T assume o valor de 0.17, muitas vezes substitui-se a parcela $0.0135 K_T$ por 0.0023. Adicionalmente, a equação pode ser utilizada com R_a em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, bastando para isso multiplicar a parcela a direita da equação por 0.408, a qual fica expressa da seguinte forma:

$$ET_o = 0,0023 * R_a * (17,8 + T) (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \quad (11)$$

Em que:

ET_o = evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

R_a = radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre (mm d^{-1});

$T_{\max}$ = temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$);

$T_{\min}$ = temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$);

T = temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$).

A radiação solar extraterrestre diária utilizada no método de Hargreaves-Samani pode ser estimada a partir da distância relativa Terra – Sol, declinação solar e ângulo horário.

A distância relativa Terra-Sol pode ser determinada segundo a equação 12 (DUFFIE & BECKMAN, 1980):

$$dr = 1 + 0,0033 \cos\left(DJ \frac{2\pi}{365}\right) \quad (12)$$

onde: DJ é o dia seqüencial do ano (dia Juliano) isto é, 1º de janeiro = 1 e 31 de dezembro = (365 ou 366) e o ângulo $\left(DJ \frac{2\pi}{365}\right)$ é dado em radianos.

Para a Radiação extra-terrestre (Ra) foi utilizada a seguinte equação:

$$Ra = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d [\varpi_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\varpi_s)] \quad (13)$$

Em que;

Ra = radiação extraterrestre (MJ m⁻² dia⁻¹);
Gsc = constante solar = 0,0820 MJ m⁻² min⁻¹;
dr = inverso da distância relativa terra-sol;
ωs = ângulo horário por do sol (radiano);
φ = latitude local (radiano);
δ = declinação solar (radiano);

A declinação solar (δ) é dada por:

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} DJ - 1,39\right) \quad (14)$$

O ângulo horário por do sol (ωs) é dado:

$$\varpi_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (15)$$

5 – PROGRAMA REF-ET (REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION CALCULATOR)

Utilizou-se o método de Regressão Linear Simples para correlacionar as estimativas do Tanque Classe “A”, do método de Priestley-Taylor, Blaney-Criddle, Hargreaves e Samani com o modelo Penman-Monteith Padrão FAO. Para tanto, o programa Reference-Evapotranspiration Calculator (Ref-ET), (ALLEN ,2001), foi usado para o cálculo da ETo. Esse programa determina com um ótimo grau de precisão os valores da evapotranspiração de referência de 15 (quinze) dos mais comuns métodos de estimativas da ETo, incluindo os métodos aqui estudados.

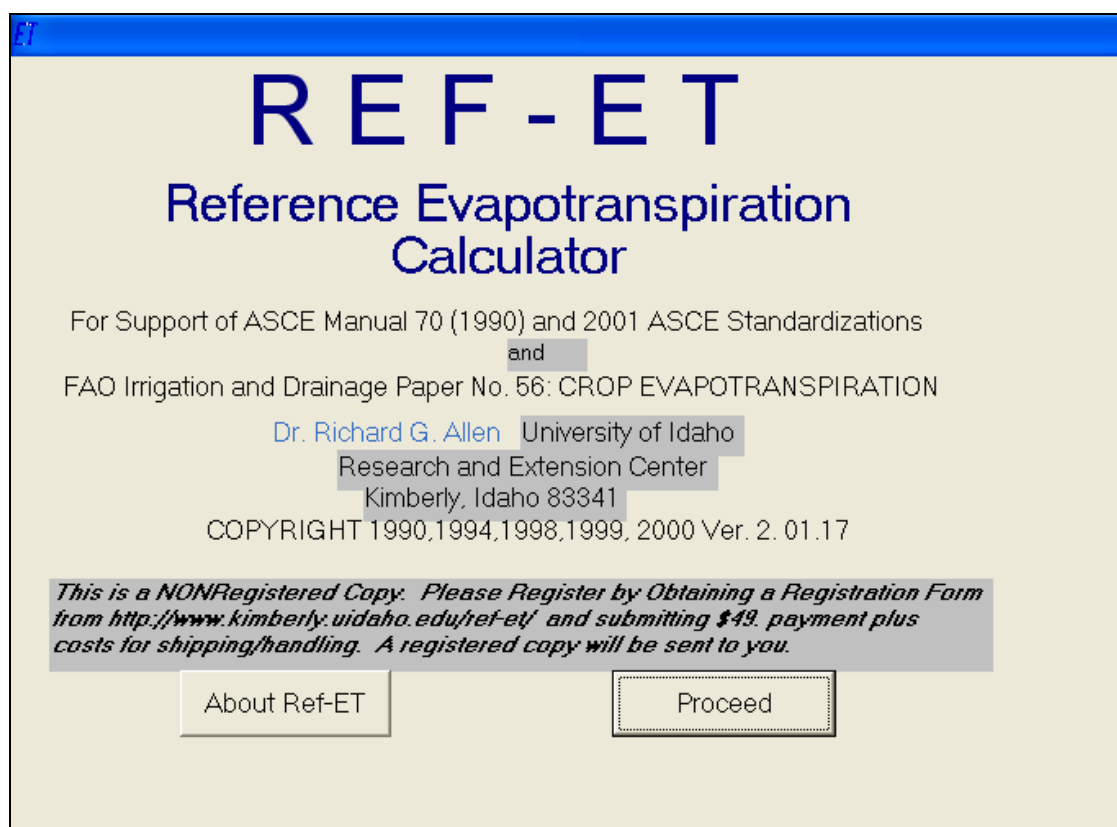


Figura 3 – Programa REF-ET (Reference Evapotranspiration Calculator).

Dados diários de temperaturas máxima, mínima e média do ar, umidade relativa, velocidade do vento e insolação, coletados na estação do CCA/UFPB, foram organizados em uma planilha no programa Excel, e se constituíram nos dados de entrada do programa.

As estimativas da evapotranspiração de referência geradas a partir do programa, foram novamente organizadas em uma planilha do Excel, calculadas as médias mensais e anuais, para se poder avaliar a evapotranspiração correspondente.

As figuras 3 e 4 representam os passos necessários para a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) através do programa REF-ET (Reference Evapotranspiration Calculator).

Description of the Weather Station and Data File

REF-ET
Label4

The anemometer height is: meters (ft)

The temperature/RH height is: meters (ft)

The weather station elevation is: meters (ft)

The weather station latitude is: degrees (~ for Southern)

(Data within box are Required only for hourly data)

The weather station longitude is: degrees**W (E or W**)

Center of time zone longitude is: degrees**W (E or W**) ← (Hint:)

(The time zone longitude must be in multiples of 15 degrees)

The default Day/Night wind ratio is: (2 if unknown*)

The weather site vegetation height: m (0 if same as ref. or as ht. specified in the data file)

The green fetch on the Class A Pan: m (1000 if unknown*)

Initial Lines of the Data file to be skipped: Code for missing data (e.g. -999)

Description of the station and data (No more than 1000 characters)

☐ For hourly data in U.S.A., Daylight Savings Time is Observed in Data Set

Note: For daily time steps, REF-ET presumes that the data represent the period from midnight to midnight. For hourly data, REF-ET presumes that the data are for the period ENDING at the indicated time.

Note: Data marked with * are required only for FAO-24 Eqns. **Req. only for hourly data.

Back Cancel Exit Continue

Figura 4 – Programa REF-ET (Reference Evapotranspiration Calculator).

OUTPUT MODES and REFERENCE EQUATIONS

UNITS

☒ System International Units

☐ English Units

OUTPUT

☒ Screen Only

☐ File and Screen

☐ Printer and Screen

INTERMEDIATE FILES

☒ teste.in1 (echo of data)

☒ teste.in2 (Intermed. Param.)

REFERENCE CHARACTERISTICS

Alfalfa/Grass Ref. Ratio: (1.15 to 1.25)

For ASCE full PM: Alt. Ref. Ht: (0.5 m = Std.)

For ASCE full PM: Grass Ht: (0.12 m is Std.)

(Hts. used unless read from data file)

ASCE-PM Surface Resistance (s/m)

for hourly

24-hour Daytime Nighttime

Alt: (45) (30) (200)

Gr: (70) (50) (200)

Select equations

ETr ET_o

☐ ASCE Penman-Monteith (full) (grass or alfalfa, rs=(timestep))

☐ ASCE Penman-Monteith (full) (grass or alfalfa w/ user spec. rs)

☐ ASCE Penman-Monteith Standardized Form (ETr and ET_o)

☒ FAO 56 Penman-Monteith (0.12 m grass reference)

☐ 1982,96 Kimberly Penman (var. wind func.) (ETr and ET_o)

☒ 1972 Kimberly Penman (fixed wind function) (for ETr only)

☐ 1948/1963 Penman (original wind function)

☐ FAO 24 Corrected Penman

☐ FAO Plant Protection Paper 17 Penman

☐ CIMIS Penman (hourly only) with FAO-56 Rn, G=0

☐ FAO 24 Radiation

☒ FAO 24 Blaney-Griddle

☐ FAO 24 Pan Evaporation

☒ 1985 Hargreaves (Hargreaves and Samani)

☒ Priestley-Taylor (1972)

☐ Makkink (1957)

☐ Turc (1961)

☐ ET measurements (Lysimeter, etc)

*NOTE: Check Boxes preceded by a * will use the specified Reference Ratio to Convert for Reference Type

☐ Skip Printing 'Header' Information in The Result File

Specify How to Handle Missing Data

Save Definition File Back Exit Continue

Figura 5 – Equações para a determinação da estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), através do programa.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados foi baseada em análise de regressão linear simples, para correlacionar os dados do modelo de ETo a partir da equação de Penman-Monteith padrão FAO, com os dados da ETo estimados pelas equações já definidas utilizando-se o programa Reference Evapotranspiration Calculator (REF-ET).

No software Excel foram feitas as organizações dos dados das variáveis climáticas para realização das médias diárias e mensais, como também as equações envolvendo os índices esperados e observados finalizando com os gráficos de dispersão 1:1, com o intuito de interpretar a tendência dos valores, junto com o R^2 , que mostra a razão ou o percentual da variância de uma das variáveis que pode ser explicado a partir da variância da outra.

Também se usou o índice de Willmott (WILLMOTT et al., 1981) e o coeficiente de desempenho “c” introduzido por (CAMARGO & SENTELHAS, 1997), apresentados na Tabela 2. O coeficiente “c” é obtido pelo produto do coeficiente de correlação “r” e “d” conforme a expressão abaixo:

$$c = r \times d \quad (16)$$

Em que:

c = Coeficiente de desempenho

r = Raiz quadrada do coeficiente de determinação R^2

d = Índice de concordância

O índice de concordância de (WILLMOTT, 1981) é calculado em função do modelo:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{\sum (|E_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (17)$$

Em que: E_i é o valor estimado, O_i é o valor observado e O é a média dos valores observados. O índice de concordância **d**, varia de 0 a 1, em que o valor 1 significa uma concordância perfeita entre dados observados e estimados, enquanto que o valor 0, significa não haver concordância entre os valores analisados. Observam-se na tabela 2 os valores de “c” com respectivos significados.

Tabela 2. Valores dos coeficientes de desempenho conforme (CAMARGO & SENTELHAS, 1997)

Valor de "c"	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sufrível
0,31 a 0,40	Mau
≤ 0,30	Péssimo

Para se quantificar os erros proporcionados pelas estimativas, calculou-se o erro médio absoluto (EMA) e o erro máximo (EM), conforme equações a seguir, e cujos elementos já foram definidos anteriormente:

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_i^n (O_i - E_i) \quad (18)$$

$$E = \max(|O_i - E_i|)_{1^n} \quad (19)$$

Os resultados das estimativas de evapotranspiração de referência para o município de Areia-PB, no período em estudo, estão contidos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores diários médios mensais de evapotranspiração de referência calculada pelos métodos do *Penman-Monteith*, *Blaney & Criddle*, *Hargreaves & Samani*, *Priestley-Taylor* e *Tanque Classe "A"* em milímetros da série 1998 - 2007.

Meses	Penman-Monteith (FAO 56)	Blaney & Criddle	Hargreaves & Samani	Priestley - Taylor	Classe "A"
Janeiro	3,7	4,2	4,0	4,0	4,7
Fevereiro	3,8	3,6	4,1	4,2	4,6
Março	3,4	3,2	4,2	3,9	4,3
Abril	3,0	3,3	3,3	3,5	3,9
Mai	2,5	2,6	3,4	3,0	3,4
Junho	2,1	2,5	2,2	2,3	2,5
Julho	2,1	2,3	2,3	2,6	2,7
Agosto	2,5	2,4	2,7	3,0	3,1
Setembro	3,1	3,1	3,3	3,5	4,0
Outubro	3,9	3,7	3,9	4,2	4,3
Novembro	4,3	4,2	4,1	4,6	4,1
Dezembro	3,9	4,3	4,1	4,2	4,3
Média	3,2	3,3	3,5	3,6	3,8

De acordo com a tabela 3, os meses de Outubro a Março, época em que ocorrem as estações primavera e verão, foram os meses que apresentaram maior taxa de evapotranspiração em todos os métodos avaliados, ficando sempre acima da média da década de 1998 a 2007, com exceção do mês de março no método de Blaney e Cridlle. Já os meses de Abril até Setembro onde ocorre o outono e inverno, ficaram abaixo da média da década, com exceção do mês de abril para o método do Tanque Classe “A”. Analisando-se ainda a referida tabela pode-se observar que, o maior valor médio da evapotranspiração de referência, considerando os anos estudados, foi obtido pelo método do Tanque Classe “A” com 3,8 mm, e o menor foi dado pelo método de Penman-Monteith com 3,2 mm.

Nas figuras a seguir pode-se observar a variabilidade temporal da evapotranspiração de referência (ET_o), determinada pelos métodos de Blaney & Criddle (BC), Hargreaves & Samani (HS), Priestley-Taylor (PT), e Tanque Classe “A” (Cl “A”), correlacionados com a ET_o (PM). A evapotranspiração de referência (ET_o) representa o valor diário médio mensal da série de anos estudada (1998 – 2007).

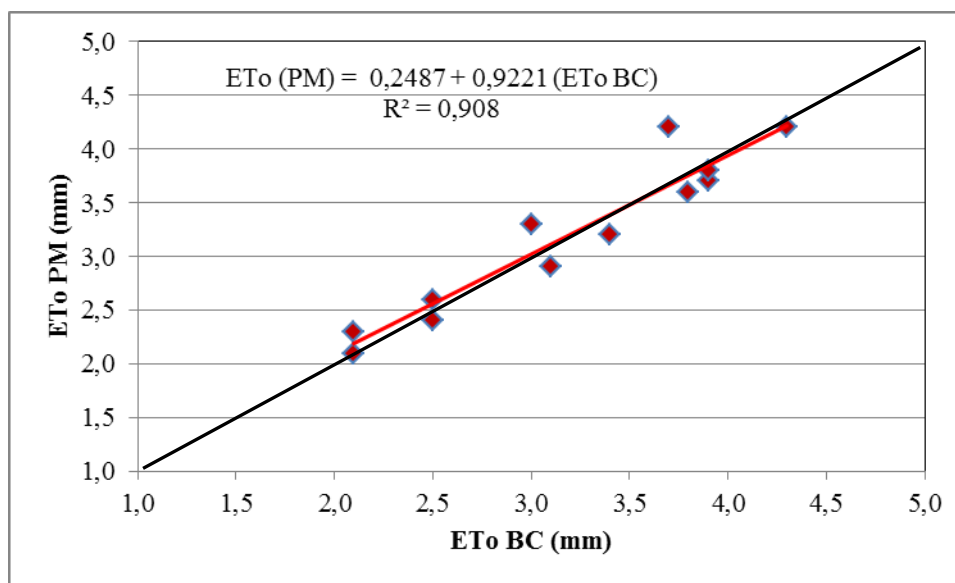


Figura 6- Evapotranspiração de referência - ET_o (mm), estimada pelo método de Blaney & Criddle (BC) comparada a (ET_o) determinada pelo modelo Penman-Monteith-Padrão FAO, médias mensais correspondente a série 1998-2007.

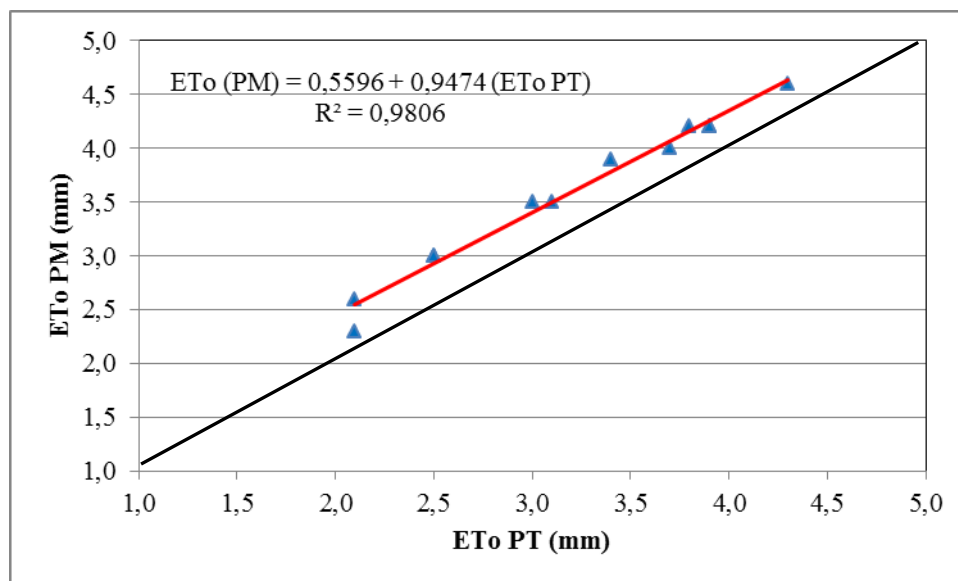


Figura 7- Evapotranspiração de referência - ETo (mm), estimada pelo método de Priestley-Taylor (PT), comparada a (ETo) determinada pelo modelo Penman-Monteith-Padrão FAO, médias mensais correspondente a série 1998-2007.

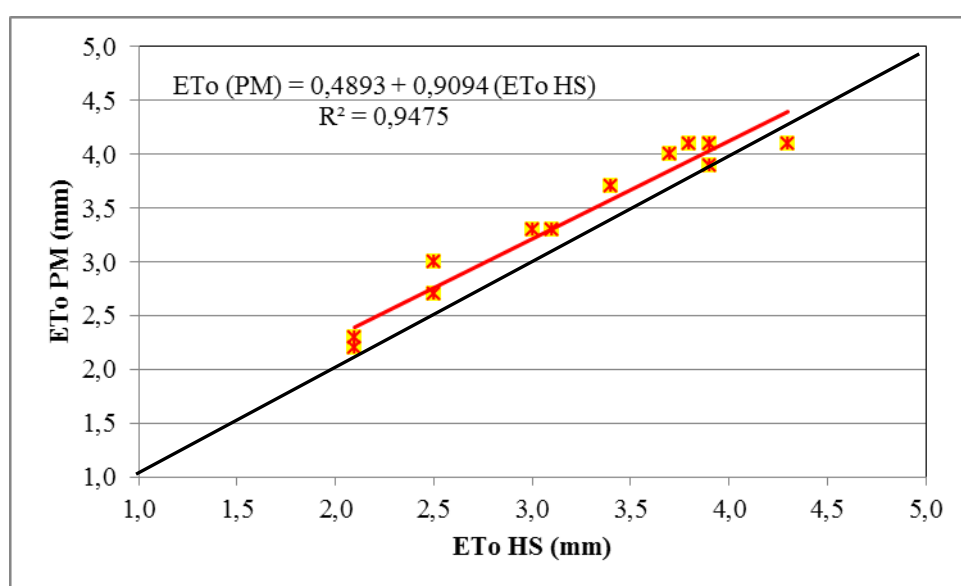


Figura 8- Evapotranspiração de referência - ETo (mm), estimada pelo método de Hargreaves & Samani (HS), comparada a (ETo) determinada pelo modelo Penman-Monteith-Padrão FAO, médias mensais correspondente a série 1998-2007.

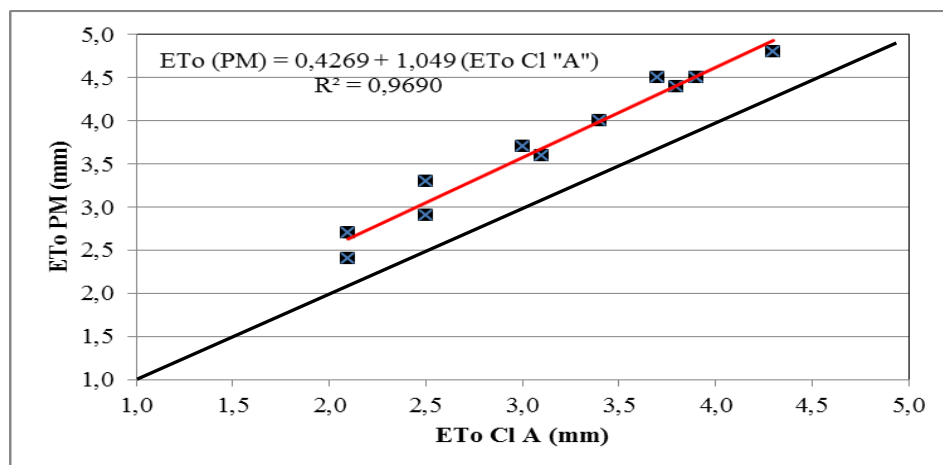


Figura 9- Evapotranspiração de referência - ETo (mm), estimada pelo método de Tanque Classe “A” (Cl “A”), comparada a (ETo) determinada pelo modelo Penman-Monteith-Padrão FAO, médias mensais correspondente a série 1998-2007.

A partir das figuras mencionadas pode-se afirmar que com exceção do modelo de Blaney & Criddle, as demais equações estudadas superestimaram a evapotranspiração de referência (ETo), determinada pelo modelo de Penman-Monteith-FAO,.

Como se pode observar, os valores dos coeficientes de determinação (R^2) de todas as equações usadas na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), estiveram acima de 0,90, mostrando uma forte correlação entre as variáveis.

Verifica-se que o método de Blaney & Criddle foi o que mais se ajustou ao modelo de Penman-Monteith, embora tenha apresentado o menor valor de R^2 (0,9080), Seguem-se as equações de Hargreaves & Samani ($R^2 = 0,9475$), Tanque Classe “A” ($R^2 = 0,969$) e Priestley-Taylor que apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9806$). Na tabela 4 abaixo estão representadas as características estatísticas de cada equação, bem como, o erro máximo absoluto (EMA).

Tabela 4. Valores dos coeficientes **a**, **b**, e de determinação R^2 da reta de regressão e do erro máximo (**EM**), para as equações de Blaney & Criddle, Hargreaves & Samani, Priestley-Taylor e Tanque Classe “A” em Areia-PB (1998-2007).

Local	Coordenadas		ETo (PM) = a + b ETo (Modelo)				EM
	Lat,	Long,	Modelo	a	b	r^2	(mm.dia ⁻¹)
Areia Estação Meteoro- lógica	- 6° 58'	35° 41'W Altitude: 574m	BC	0,8927	0,3222	0,9080	0,90
			HS	0,9188	0,4899	0,9475	1,14
			PT	0,9702	0,5192	0,9806	1,46
			Cl “A”	1,1149	0,2039	0,9690	1,33

Quando se calculou o erro médio absoluto (EMA) o método de Blaney & Criddle foi o que apresentou o menor erro (0,18mm dia⁻¹), seguido de Hargreaves & Samani (0,55mm dia⁻¹), com resultado idêntico encontrado por Medeiros, A.V.(2002), no município de Paraipaba-CE. O erro máximo, calculado segundo a equação 19, foi de 0,90mm.dia⁻¹ para o método de Blaney & Criddle, 1,33mm.dia⁻¹ para o Tanque Classe “A”, 1,46mm.dia⁻¹ para o de Priestley-Taylor e 1,14mm.dia⁻¹ para o método de Hargreaves & Samani. Medeiros, A.V. (2002) encontrou o erro máximo em 1,76, 1,033 e 3,75 para HS, PT e CL “A” respectivamente. Considerando-se ainda a análise feita usando-se o índice de Willmott já definido anteriormente, pode-se observar segundo a Tabela 5, que entre os valores calculados para todos os métodos, destaca-se o de Blaney & Criddle ($c = 0,89$), seguido do Tanque Classe “A” ($c = 0,62$), Hargreaves & Samani ($c = 0,60$) e Priestley-Taylor ($c = 0,59$).

Pode-se, portanto, considerando os valores de “ c ”, afirmar que o método de Blaney & Criddle teve um desempenho muito bom na estimativa de ETo (valor de c entre 0,81 e 0,90) e os demais métodos um desempenho mediano (valor de c entre 0,51 a 0,70).

Para o índice de concordância “ d ” de WILLMOTT, obteve-se resultados de 0,93 para Blaney & Criddle, seguido de 0,63 no Tanque Classe “A”, 0,61 para Hargreaves & Samani, 0,58 em Priestley-Taylor.

Medeiros, A. V. (2002), encontrou resultados de valor inferior em $r = 0,68$, superior em $d = 0,67$, e abaixo em $c = 0,45$, para HS, resultados subestimado em $r = 0,80$, sobestimado em $d = 0,87$ e $c = 0,70$ para PT, e subestimado em $r = 0,65$, sobestimado em $d = 0,68$ e subestimado em $c = 0,44$ para classe A.

Araújo, W.F.; Antunes S. A.; Santos, C. A. E. dos, encontraram para Boa Vista, capital de Roraima, valores subestimado de $r = 0,789$, e parecidos para $d = 0,57$ e $c = 0,57$ para HS, valores aproximados de $r = 0,980$, $d = 0,92$, $c = 0,92$ para BC, e resultados próximos de $r = 0,952$, sob estimados $d = 0,79$, $c = 0,79$ para CL”A”.

Tabela 5. Valores dos coeficientes **r**, **d**, e **c** (produto de **r** e **d**), além do erro médio absoluto (EMA), para as equações de Blaney & Criddle, Hargreaves & Samani, Priestley-Taylor e Tanque Classe “A” em Areia-PB.

Métodos	EMA	r	d	c
Blaney & Criddle	0,18	0,9528	0,93538	0,89
Hargreaves & Samani	0,55	0,9733	0,61692	0,60
Priestley-Taylor	1,39	0,9902	0,58235	0,59
Tanque Classe “A”	1,37	0,9844	0,63415	0,62

7- CONCLUSÕES

O método de Blaney & Criddle foi o que apresentou o menor coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9080$), no entanto, quando se calculou o erro médio absoluto (EMA) e o erro máximo (EM), seu desempenho foi considerado o melhor entre as metodologias estudadas para estimativa da ETo.

Quando se calculou o índice “c” de (Camargo e Sentelhas, 1997) observou-se também que a metodologia de Blaney & Criddle foi a que apresentou o melhor desempenho mostrando mais uma vez sua eficiência na estimativa de ETo para as condições locais, bem como para o índice de concordância “d” de WILLMOTT.

Isso indica que o método de Blaney e Criddle pode ser utilizado em substituição ao método de Penman-Monteith para estimativa da ETo nas condições de Areia-PB, pela simplicidade de sua aplicação, uma vez que o mesmo utiliza menos variáveis meteorológicas (temperatura média do ar) e um valor tabelado da porcentagem de horas de brilho solar.

O Tanque Classe “A” obteve resultados satisfatórios, sendo o melhor método avaliado depois de Blaney & Criddle, o que favorece também a sua utilização para a estimativa da evapotranspiração de referência, pois o mesmo para ser aplicado requer apenas dados de velocidade do vento e da umidade relativa, elementos esses facilmente encontrados em diversas estações meteorológicas.

Os métodos de Hargreaves & Samani e o de Priestley e Taylor tiveram um desempenho abaixo dos demais, no entanto podem também serem utilizados, na medida em que, para as outras metodologias melhores avaliadas, não se disponham de dados suficientes para determinação da evapotranspiração de referência.

O coeficiente Kp aplicado no cálculo da evapotranspiração do Tanque Classe “A” utiliza de variâncias climáticas locais, portanto recomenda-se para as condições de Areia-PB, utilizar o $K_p = 0,70$.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-GHOBARI, H. M. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia. **Irrigation Science**, v.19, n.2, p 81-86, 2000.

ALLEN, R. G. REF-ET: reference evapotranspiration calculator, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 2001. 82 p. (Software).

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.4, 1989, p.650-662.

ALLEN R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. et al. Crop evapotranspiration. Rome: FAO, 1998. 297p (**FAO Irrigation and Drainage Paper, 56**).

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, May, 1986.

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

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PERRIER, A. An update for the calculation of reference evapotranspiration. **ICID BULLETIN**, v.43, n.2, p.35-91, 1994b.

AZEVEDO, B. M. **Evapotranspiração de referência obtida com a Razão de Bowen, Lisímetro de pesagem e equação de Penman-Monteith utilizando sistemas automáticos**. Piracicaba, 1999. 81p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

BASELGA, J.J.; ALLEN, R.G. A Penman-Monteith for a semi-arid climate in Solth-Western Spain. **Transactions of the ASAE**, v.39, p.999-1007, 1996.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. Evaporação e evapotranspiração. Porto Alegre: IPAGRO/Secretaria de Agricultura, 1981. 95p. Boletim Técnico 7.

BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.293-300, 2007.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO Irrigation and drainage paper, 24).

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley & Sons, 1980. 705 p.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

HUSSEIN, A. S. A. Grass ET estimates using Penman-type equations in Central Sudan. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.125, n.6. p324-329. 1999.

JENSEN, M.W.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. et al. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: American Society of Civil Engineers (ASCE), 1990. 329p. **Manual and Reports on Engineering Practices, 70**).

LÓPEZ-URREA, R.; MARTÍN de S. O. F.; FABEIRO C.; MORATALLA A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. **Agricultural Water Management** 85, 2006, 15–26.

MAGGIOTTO, S.R. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho**. Piracicaba, 1996. 71p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

MARTÍNEZ-COB, A., TEJERI-JUSTE, M. (2004) A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ETo estimation equation in semiarid regions. **Agriculture Water Manager**. 64:251–264.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência através do programa REF-ET, para duas localidades do Nordeste.** Fortaleza, 1996. 95p. (Dissertação Mestrado) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará.

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 - Piracicaba, 2002.** 103 p. : il. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.

MONTEITH, J.L. Evaporation from land surfaces: Progress in analysis and prediction since 1948. pp. 4-12. In Advances in Evapotranspiration, **Proc. National Conference on Advances in Evapotranspiration**, Dec. 1985, 16-17, Chicago, IL, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment: Rothmsted Experimental Station. Harpendem, Herts, v.19, p.205-234, 1965. (**Publications in Climatology**, v. XI, n.3).

MONTEITH, J.L. and UNSWORTH. M.H., 1990, **Principles of Environmental Physics**, 2nd Ed., Edward Arnold, New York, p. 53-54.

PENMAN, H. L. Evaporation, transpiration and evapotranspiration. In: Vegetation and hydrology. **Farnham Royal: Commonwealth Agricultural Bureaux.**, 1963, p.30-50.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, v.193, n.1, p.454-465, 1948.

PEREIRA, A R., ANGELOCCI, L.R., SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; Analysis of the Priestley-Taylor parameter. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.61, p.1-9, 1992.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração** Piracicaba: FEALQ, 1997a. 183p.

PEREIRA, F.A.C. **Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em relação a um lisímetro de pesagem.** Piracicaba, 1998. 87p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P. C. O parâmetro de Priestley-Taylor para a estimativa da evapotranspiração de referência na escala mensal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.83-87, 1997b.

PERES, J.G. **Avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, para estimar a evapotranspiração de referências nas condições climáticas do estado de São Paulo.** 1994. 116p.

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

RIBEIRO, R. S. F. **ET estimation using Penman-Monteith equation compared to ET measured by lysimetry.** Knoxville: University of Tennessee, 1996. 15p.

SENTELHAS, P. C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática.** Piracicaba, 1998. 97p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

SENTELHAS, P. C; ANGELOCCI, L. R. **LCE 306 – Meteorologia Agrícola: Evapotranspiração – Definições e Conceitos.** Disponível em <<http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula8.pdf>>. Acesso em 12/02/13.

SILVA, V. DE P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v.1, n.58, p.575-596, 2004.

SILVA, V. P. R.; FILHO, A. F. B.; SILVA, B. B.; CAMPOS, J. H. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 14, 2005, Campinas. **Anais... Campinas: SBA, 2005**. CD Rom.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**: Rome: FAO, 1991. 54 p.

SULEIMAN, A. A.; HOOGENBOOM, G. Comparison of Priestley-Taylor and FAO-56 Penman-Monteith for daily reference evapotranspiration estimation in Georgia. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.33, n.2, 175-182. 2007.

THORNTHWAITE, C.W. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographycal Review**, v.38, p.55-94, 1948.

WILLMOTT, C.J. Rowe, C. M. and Philpot, W. D. 1985. 1981. Average Monthly and annual surface air temperature and precipitation data for the world. Part 1: the eastern hemisphere. Part 2: the western hemisphere. **Publications in Climatology**, 34, (1) and (2).