



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE
ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
PARA BRASÍLIA – DF**

Jasmim Teixeira da Cruz

Brasília, DF

Julho/2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

Jasmim Teixeira da Cruz

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE
ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
PARA BRASÍLIA – DF**

Monografia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília – UnB, como parte das exigências do curso de Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Engenheira Agrônoma.

Orientadora: Profa. Dra. Selma Regina Maggiotto

Brasília, DF

Julho/2016



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

Termo de Aprovação

Autor: Jasmim Teixeira da Cruz

Título: Avaliação de Métodos de Estimativa de Evapotranspiração para Brasília - DF

Monografia de conclusão do Curso de Graduação em Agronomia apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília –UnB.

Aprovado em: Brasília, 8 de julho de 2016.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Selma Regina Maggiotto
Universidade de Brasília - UnB
Orientadora

Prof. Dr. João José da Silva Júnior
Universidade de Brasília – UnB
Examinador

Ricardo de Sousa Mendes
M. Sc. Ciências Agrárias
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua imensa misericórdia em minha vida, pela sua graça bendita que me permite viver e realizar debaixo de sua poderosa e soberana mão. Ele é tudo em todos, por isso a ele mesmo seja dada a glória sobre todas as coisas por toda a eternidade.

Agradeço a minha mãezinha querida, Luciana Teixeira, que com sua força, garra e suor foi incansável na busca das melhores oportunidades para mim. Todas as minhas conquistas, desde as menores às maiores, devo a você, minha mãe. Nem todos os meus esforços seriam capazes de retribuir tudo o que você fez e faz por mim. Agradeço ao meu pai, José Dilson da Cruz, que com seu apoio sempre me fez acreditar que eu poderia ser o que quisesse, obrigada por acreditar em mim, paizinho. Agradeço às minhas tias e primos que sempre foram tão presentes e especiais em minha vida, meu amor por vocês está guardado no meu coração. Dentre as minhas tias, agradeço especialmente à minha tia Doraci Maria, que sempre foi uma segunda mãe maravilhosa, um porto seguro ao qual me apego com muita força, obrigada por ser essa pessoa tão especial em minha vida, te amo muito.

Agradeço ao meu noivo, Darwin Barbosa, por todo seu companheirismo e dedicação durante esses cinco anos, você trouxe apenas alegria e esperança para minha vida, como me faz feliz saber que passarei a vida ao seu lado!

Agradeço aos meus amigos tão queridos e especiais, do famoso Bola Murcha. Sem vocês, essa graduação não teria metade dos bons momentos. A amizade de vocês vale ouro para mim, vou carregar vocês no meu coração pra onde eu for.

Agradeço aos professores da FAV por, apesar das circunstâncias, terem partilhado conosco seus conhecimentos e experiências, me sinto muito honrada por tê-los tido como meus mestres. Nenhum valor é capaz de pagar aquilo que vocês fazem por seus alunos. Em especial, agradeço a Prof^a Dr^a Selma Maggiotto, que orientou esse projeto, por sua paciência, dedicação, bom humor, inteligência e praticidade. Foi um grande prazer ser sua orientanda; poder trabalhar ao lado de uma pessoa tão capaz e adorável foi uma grande alegria.

A minha mãe querida, razão
e motivação de todos meus
esforços, dedico.

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão de literatura	3
2.1	Água e produção agrícola.....	3
2.2	Evapotranspiração	4
2.3	Evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura.....	4
2.4	Medida e estimativa da evapotranspiração.....	6
2.4.1	Método de Thornthwaite-Camargo	8
2.4.2	Método de Makkink	8
2.4.3	Método de Hargreaves-Samani	8
2.4.4	Método de Priestley-Taylor.....	9
2.4.5	Método de Penman-Monteith Padrão FAO	9
2.4.6	Comparação entre métodos de estimativa da ETo	9
3	Objetivos.....	12
4	Material e Métodos	13
4.1	Descrição da área de coleta dos dados	13
4.2	Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.....	13
4.2.1	Método de Thornthwaite-Camargo (EToTC)	14
4.2.2	Método de Hargreaves & Samani (EToHS)	15
4.2.3	Método de Makkink (EToMK)	15
4.2.4	Método de Priestley-Taylor (EToPT)	16
4.2.5	Método de Penman-Monteith Padrão FAO (EToPM)	17
4.3	Comparação entre os métodos.....	19
5	Resultados e Discussão.....	21
5.1	Caracterização climática	21
5.2	Método de Thornthwaite-Camargo (EToTC)	22

5.3	Comparação entre os métodos de estimativa da ETo diária.....	23
6	Conclusões.....	30
7	Referências Bibliográficas.....	31

Índice de Figuras

- Figura 1. Correlações entre os valores da ETo observados (*EToPM*) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo (2001-2014), em mm dia⁻¹ nos meses de janeiro a junho, para a região de Brasília, DF. 28
- Figura 2. Correlações entre os valores da ETo observados (*EToPM*) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo (2001-2014), em mm dia⁻¹ nos meses de julho a dezembro, para a região de Brasília. 29

Índice de Tabelas

Tabela 1. Índice de concordância, conforme proposto por Camargo e Sentelhas (1997).	20
Tabela 2. Comparação entre a temperatura média mensal medida na Fazenda Água Limpa no período em estudo e a Normal Climatológica para Brasília (INMET)..	21
Tabela 3. Comparação entre o total de precipitação mensal medido na Fazenda Água Limpa no período em estudo e a Normal Climatológica para Brasília (INMET)..	22
Tabela 4. Valores de evapotranspiração mensal, calculado pelo método de Thornthwaite-Camargo (ET_{oTC}) e somatória dos valores diários calculados pelo método de Penman-Monteith Padrão FAO (ET_{oPM}), para a Fazenda Água Limpa no período de 2001 a 2014.	23
Tabela 5. Índices estatísticos para comparação entre o cálculo da ET_o pelo método de Hargreaves-Samani (ET_{oHS}) e o método Penman-Monteith Padrão FAO: a : coeficiente linear; b : coeficiente angular; r^2 : coeficiente de determinação; r : coeficiente de correlação; c : índice de concordância; d : coeficiente de Willmott; classificação pelo índice c proposta por Camargo e Sentelhas (1997).	24
Tabela 6. Índices estatísticos para comparação entre o cálculo da ET_o pelo método de Makkink (ET_{oMK}) e o método Penman-Monteith Padrão FAO: a : coeficiente linear; b : coeficiente angular; r^2 : coeficiente de determinação; r : coeficiente de correlação; c : índice de concordância; d : coeficiente de Willmott; classificação pelo índice c proposta por Camargo e Sentelhas (1997).....	25
Tabela 7. Índices estatísticos para comparação entre o cálculo da ET_o pelo método de Priestley-Taylor (ET_{oPT}) e o método Penman-Monteith Padrão FAO. a : coeficiente linear; b : coeficiente angular; r^2 : coeficiente de determinação; r : coeficiente de correlação; c : índice de concordância; d : coeficiente de Willmott; classificação pelo índice c proposta por Camargo e Sentelhas (1997).	26

CRUZ, J. T. da. Avaliação de Métodos de Estimativa de Evapotranspiração para Brasília – DF. 2016. 44 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade de Brasília – UnB.

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi comparar quatro métodos de estimativa de evapotranspiração de referência ao método Penman-Monteith Padrão FAO e verificar o mais adequado para a região de Brasília-DF. Dados meteorológicos de 14 anos (2001-2014) obtidos na estação meteorológica da Fazenda Água Limpa, da UnB, foram usados para a comparação mensal do desenvolvimento desses métodos. Como resultado, o método de Priestley-Taylor apresentou o melhor desempenho, com índice de concordância de Willmott (d) bem próximos a 1, o que indica boa acurácia em relação ao método padrão. O método de Makkink o segue em relação ao desempenho, podendo ser usado para a região sem grandes diferenças, com índice de concordância de 0.951 até 0.692. O método de Hargreaves-Samani apresentou significativas diferenças em relação ao método padrão, não sendo recomendado para a região. Além destes, também foi comparado ao método padrão, um de estimativa de evapotranspiração mensal, Thornthwaite-Camargo, que, comparado ao método padrão, apresentou grande superestimativa, sendo também não recomendado.

1 Introdução

Um dos principais desafios da humanidade é o atendimento da demanda de água de boa qualidade, sendo que a escassez de água para irrigação e outros usos já é fato em diversas regiões do Brasil e do mundo em alguns períodos do ano. Esse fato aliado ao crescimento populacional, e também da produção agrícola, tem gerado questionamentos a respeito do futuro da segurança alimentar.

Nesse contexto, cresce a necessidade de conhecimento a respeito dos componentes do ciclo hidrológico, dentre os quais a evapotranspiração se destaca com relevância. Sua estimativa é necessária para estudos de balanço hídrico, projetos e manejo de irrigação, modelagem de processos climatológicos, planejamento do gerenciamento dos recursos hídricos, e outras atividades que cooperam para o entendimento do ciclo da água, contribuindo com a elaboração de métodos de preservação mais efetivos.

A partir do conhecimento da evapotranspiração, largamente estudada e com inúmeros métodos desenvolvidos ao longo dos anos, é possível realizar uma estimativa realista, que atenda às necessidades hídricas da cultura e não gere o desperdício de água potável.

Vários métodos foram desenvolvidos ao longo dos anos para medição da evapotranspiração, métodos diretos e indiretos resultantes do uso de equações alimentadas por dados das variáveis climáticas que afetam a evapotranspiração são largamente estudados e aplicados. No entanto, a determinação da evapotranspiração em condições de campo não é fácil, métodos como lisímetros, razão de Bowen e correlação turbulenta são pouco práticos e envolvem altos custos para sua implementação. Por isso os métodos indiretos, como as equações de estimativa, tornam-se a alternativa mais comum. Apesar disso, elas podem ser limitadas pela ausência de dados e pela falta de precisão, que pode ocorrer quando a equação proposta não é adaptada às condições climáticas do local.

Dentre os diversos métodos de cálculo da evapotranspiração, destaca-se o método Penman-Monteith, recomendado pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) para cálculo da evapotranspiração de referência e utilizado para a calibração de outros métodos. No entanto, esse método requer variáveis climáticas não

disponíveis na maioria das estações meteorológicas brasileiras o que abre a necessidade da utilização de outros métodos indiretos, menos exigentes em relação aos dados requeridos. Para a verificação do desempenho de uma equação é necessária sua comparação e análise de desempenho em relação ao Método Penman-Monteith Padrão FAO através de variáveis estatísticas que permitam averiguar se o método é satisfatório para cálculo da evapotranspiração da região em análise. Neste trabalho as equações de Thornhwaite-Camargo, Hargreaves&Samani, Makkink e Priestley-Taylor foram comparadas estatisticamente com o Método Penman-Monteith Padrão FAO para região de Brasília-DF utilizando dados meteorológicos obtidos na estação automática da Fazenda Água Limpa, da UnB, no período de 2001 a 2014.

2 Revisão de literatura

2.1 Água e produção agrícola

A agricultura tem forte impacto sobre o meio ambiente, e seu efeito mais preocupante é sobre os recursos hídricos, visto que o racionamento de água já é realidade para vários países. Em 2014, o Brasil, país que detém 12% da água doce do mundo e 53% dos recursos hídricos da América do Sul, passou por uma grave crise hídrica, que afetou gravemente a região chamada de Polígono das Secas (que abrange os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e norte de Minas Gerais) e parte da região Sudeste e Centro-Oeste, com destaque para São Paulo e Distrito Federal, crise essa que deverá se fazer sentir pelos próximos anos (MACEDO, 2015). No mundo, uma área de aproximadamente 1,56 bilhão de hectares está destinada para produção agrícola.

Cerca de 304 milhões de hectares contam com infraestrutura de irrigação (COSGROVE; COSGROVE, 2012), o que é um fator importante para o aumento da eficiência da produção de alimentos: 18% da área total, com cultivo irrigado, é responsável por 44% da produção agrícola (CHRISTOFIDIS, 2012); em termos globais, a produtividade da área agrícola irrigada chega a ser 2,7 vezes maior que a realizada em sequeiro. Por isso a expansão da área irrigada é importante para a continuidade da expansão da produção de alimentos, o que possibilita a manutenção da segurança alimentar. Estima-se que exista o potencial de crescimento de 180 milhões de hectares de áreas irrigadas em todo o mundo; desse total, 14% dessas áreas potenciais estariam no Brasil (CHRISTOFIDIS, 2012). Diante desse aumento de áreas, tem-se como consequência o aumento da demanda de recursos hídricos, e a previsão é de que esse aumento seja entre 5 e 11% entre 2008 a 2050 (COSGROVE; COSGROVE, 2012).

A conjuntura atual expressa acima demonstra a necessidade de um manejo de recursos hídricos mais apurado, criterioso e tecnicamente bem dimensionado. Para tanto, o conhecimento de fatores ambientais, climáticos e da própria cultura se fazem essenciais para um planejamento agrícola irrigado eficiente e menos oneroso ao meio ambiente. A evapotranspiração se revela como um dos conhecimentos essenciais a ser estudado, pois é um dos principais parâmetros para se estimar matematicamente a irrigação necessária, juntamente com a precipitação (BERNARDO et al., 2006).

2.2 Evapotranspiração

O conceito de evapotranspiração pode ser definido, segundo Pereira et al. (1997) como: “ processo conjunto de evaporação e de transpiração que ocorre naturalmente em uma superfície vegetada”; ou, segundo Bernardo et al. (2006): “quantidade de água evaporada e transpirada por uma superfície vegetada durante determinado período”. A evaporação é o processo físico pelo qual a água passa do estado líquido para o estado gasoso. Ocorre continuamente em rios, lagos, solo e na vegetação úmida. A transpiração é a perda de vapor d'água por parte da planta, que a libera pelos seus estômatos. Quando essa ocorrência é mais intensa que a absorção de água do solo, ocorre o murchamento (BERNARDO et al., 2006).

Vários fatores afetam a taxa de evapotranspiração, dentre eles, podemos citar fatores climáticos como: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, chuva, pressão de vapor, e fatores da própria planta, relacionados às suas características específicas, como área foliar, estágio de desenvolvimento e arquitetura foliar (MEDEIROS, 2002). Dentre os elementos climáticos, a radiação solar é o mais importante para a estimativa da evapotranspiração, pois ela é a maior fonte de energia que possibilita a passagem da fase líquida para gasosa da água. Por isso a evapotranspiração é função da quantidade de energia solar que chega até a área cultivada. Plantas isoladas ou pequenas áreas cultivadas próximas a áreas com solos descobertos terão maior taxa de evapotranspiração (BERNARDO et al., 2006).

2.3 Evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura

Devido a suas diferenças morfológicas e fisiológicas, cada cultura tem uma taxa de evapotranspiração potencial, aquela que ocorre em condições ideais de disponibilidade hídrica. Por essa discrepância, surgiu a necessidade de se estabelecer uma taxa de evapotranspiração padrão, ao que se chamou evapotranspiração de referência (ET_o), definida como: “evapotranspiração de uma cultura hipotética que cobre todo o solo, em crescimento ativo, sem restrição hídrica nem nutricional, com altura média de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência de superfície de 70 s m⁻¹” (ALLEN et al., 1998), definição essa que é tomada atualmente como padrão pela FAO.

O conceito de evapotranspiração de referência foi introduzido para estudar a demanda de evapotranspiração da atmosfera independentemente do desenvolvimento de

uma cultura. Os únicos fatores capazes de afetar a ETo são parâmetros climáticos calculados a partir de dados meteorológicos, ou seja, a ETo expressa o poder evaporante da atmosfera numa época do ano com condições climáticas específicas (ALLEN et al., 2006).

A evapotranspiração potencial ou máxima da cultura (ETc) é a que ocorre quando não há limitação de água, ou seja, é toda a evapotranspiração que poderia ocorrer em condições ótimas para o desenvolvimento da cultura. Sua relação matemática com a ETo é:

$$ETc = ETo \times Kc$$

Em que:

Kc- coeficiente da cultura.

O Kc é um coeficiente que reflete a taxa de variação do uso da água de acordo com o estágio de crescimento da planta (FERREIRA, 2010). Ele representa o uso da água por uma cultura específica e ajuda no entendimento da necessidade hídrica de diferentes culturas em uma dada área (KASHYAP& PANDA, 2001).

Os valores de Kc variam com a cultura e seu estágio de desenvolvimento. O valor do Kc é função do índice de área foliar (IAF), que aumenta até atingir um valor máximo próximo à fase reprodutiva da planta, e depois decresce no período de senescência das folhas (PEREIRA et al., 2002). De acordo com sua estrutura morfológica, uma planta pode ser mais ou menos eficiente no uso da energia que a cultura de referência, em geral, um gramado, que serve de base de cálculo para a ETo (PEREIRA et al., 2002). Uma dada cultura pode ter o Kc maior (se mais eficiente) ou menor (se menos eficiente) do que 1,0, o que ocorre em função de sua altura e maior interação com a atmosfera (PEREIRA et al., 2002).

Alguns dos fatores listados por ALLEN et al. (2006) para variação do Kc são: tipo de cultivo, clima da região, evaporação do solo e estágio de crescimento. Mas segundo Ferreira (2010), o Kc também varia de acordo com técnicas de cultivo e métodos de irrigação. Um sistema de irrigação que aplica água apenas em parte da área, como fazem sistemas de aplicação localizada com gotejamento e microaspersão, resultam em Kc menores do que os ocorrem em sistemas de aplicação na área total, pois a área de solo que deixa ser umedecida tem sua evaporação reduzida (FERREIRA., 2010).

2.4 Medida e estimativa da evapotranspiração

A medida direta da evapotranspiração é difícil, portanto sua utilização só é justificável em condições experimentais (PEREIRA et al., 2002). Para essa medição, o lisímetro é o equipamento mais utilizado e mais preciso entre os métodos diretos, se instalado corretamente. Ele consiste em um tanque enterrado no solo, devendo ser suficientemente largo, com no mínimo de 2 m² de superfície suficientemente profundo, devendo ser instalado numa área plana, homogênea em cultura e solo. Os lisímetros são divididos em 2 categorias: pesáveis e não pesáveis. Os primeiros permitem a determinação de ET em períodos curtos – diário ou horário, e é importante para ajuste dos coeficientes de correção dos métodos indiretos ou empíricos de determinação de ET (BERNARDO et al., 2006). O cálculo de ET pelo método do lisímetro de pesagem se dá pela variação do peso do solo em relação a área do tanque. Já os lisímetros não pesáveis, de drenagem ou de lençol freático constante, são adequados para grandes períodos de medição e se baseiam no princípio de conservação de massa para a água em um volume de solo (CAMARGO, 1962; PEREIRA et al., 2002).

Segundo Bernardo et al (2006), outros métodos diretos para medição de ET seriam: métodos das parcelas experimentais, que deve ser usado para determinação da ET durante todo o ciclo da cultura e método do controle da umidade do solo, usado com resultados satisfatórios em locais de solo uniforme, com lençol freático profundo, de modo que não influencie na umidade na zona radicular da cultura.

Além dos métodos diretos de medição, tem-se os métodos indiretos, de estimativa da ETo, que são mais usuais e de fácil aferição. Para seu uso são necessários dados climáticos, em geral de fácil obtenção, e a disponibilidade destes é um dos principais fatores ao se escolher um método de estimativa de ETo (CAPORUSSO & ROLIM, 2015).

Os métodos indiretos são divididos em dois grupos: evaporímetros e equações de estimativa. No primeiro grupo destaca-se o tanque classe A (TCA), que, apesar de desvantagens como facilidade de acesso a animais e o fato da evaporação ocorrer também no período noturno (SENTELHAS, 2001), por seu manejo facilitado e baixo custo é uma opção bastante utilizada em campo. Ele se baseia na estimativa da evapotranspiração a partir da evaporação de água ocorrida num tanque padronizado,

circular de aço inoxidável ou galvanizado em chapa número 22, com 121 cm de diâmetro (1,15 m² de área evaporante) e 25,5 cm de profundidade, devendo ser instalado a 15 cm do solo sobre um estrado de madeira, em área gramada (PEREIRA et al., 2002; BERNARDO et al., 2006). A leitura da evaporação é realizada num poço tranquilizador onde está instalado um parafuso micrométrico com gancho capaz de medir variações de 0,01 mm de água evaporada.

Os atmômetros são também evaporímetros nos quais a evaporação se dá por meio de uma superfície porosa e são menos usuais pela chance maior de erro devido ao risco de presença de sal ou sujidades em seus poros, além de sua maior sensibilidade ao vento (BERNARDO et al., 2006). Apesar dessas limitações, esses ainda são usados a nível experimentação para dimensionamento de sistemas de irrigação. Fachini e Galbiatti (2004) avaliaram com uso de atmômetro a relação entre níveis de irrigação e tipos substrato para formação de mudas de laranjeira e consideraram a estimativa de demanda hídrica pelo atmômetro satisfatória para seus objetivos.

Apesar de todas as possibilidades de estimativa de ETo por meios diretos ou indiretos com uso de estruturas físicas, o método indireto por equações com uso de dados meteorológicos, segundo Bernardo (2006), é o meio mais usado para a estimativa de ETo. Apesar da possível complexidade na obtenção dos dados adequados para uso nas equações de estimativa dos diferentes modelos, seus resultados alcançam um desempenho bastante satisfatório em termos de evapotranspiração de referência. Vários são os modelos de estimativa, sendo a equação Penman-Monteith padrão FAO o método considerado o mais preciso. No entanto, seu nível de exigência de entrada de dados dificulta sua aplicação (PAIVA & SOUZA, 2016), levando ao uso de equações menos precisas, mas que permitem uma boa uma estimativa de ETo, de acordo com as variáveis climáticas disponíveis em uma região. Vários trabalhos são elaborados comparando a equação de Penman-Monteith às outras com o objetivo de se estabelecer um método que melhor estime a ETo. Tais pesquisas têm grande importância se analisados no contexto de necessidade de uso racional da água, já que possibilitam a estimativa da necessidade hídrica de uma cultura em uma região objetivando o dimensionamento de sistemas de irrigação adequados para atender à necessidade hídrica das culturas.

Os métodos indiretos estudados neste trabalho são descritos a seguir:

2.4.1 Método de Thornthwaite-Camargo

O método de Thornthwaite-Camargo, que é um método empírico baseado na temperatura do ar, foi desenvolvido a partir da equação de Thornthwaite (1948). O método original expressa a evapotranspiração mensal como uma função exponencial da temperatura média do ar, tendo precisão razoável em climas úmidos, mas apresenta limitações em regiões tropicais por desconsiderar o fator da radiação solar, podendo subestimar a ETo em 40% (OLIVEIRA, 1998), devendo ser aceita com ressalvas como uma estimativa grosseira da evapotranspiração (VAREJÃO-SILVA, 2006). A modificação realizada por Camargo et al. (1999) é uma adaptação da equação para qualquer condição climática. Para isso, se utiliza a temperatura efetiva, que expressa a amplitude térmica local ao invés da temperatura média do ar. Esta modificação faz com que a nova equação não subestime ETo em condições de clima seco, representando melhor as condições meteorológicas no período diurno (MOURA et al., 2013). Sua desvantagem em relação a equação que a gerou é a necessidade de dados de temperatura mínima e temperatura máxima, ao invés de apenas a temperatura média.

2.4.2 Método de Makkink

O método de Makkink (1957) também é um método empírico, que relaciona a ETo com a radiação solar ao nível da superfície, expressa em equivalente de evaporação. Este método também leva em consideração a temperatura do bulbo úmido (T_u), mas na falta deste dado, pode haver a substituição pela temperatura média diária do ar (T_{med}), devendo considerar que para atmosfera não saturada, $T_{med} > T_u$, o que eleva o fator de ponderação utilizado na equação, fazendo com que a ETo, no caso do uso de T_{med} em lugar de T_u , seja ligeiramente superestimada (PEREIRA et al., 1997).

2.4.3 Método de Hargreaves-Samani

O método de Hargreaves-Samani (1985), método empírico desenvolvido em uma região de clima seco, é aplicável em regiões áridas como o nordeste do Brasil, mas por essa condição específica acaba apresentando superestimativa em locais úmidos. Uma outra limitação notável deste método é a sua tendência a subestimar os valores de ETo sob condições de vento forte ($U > 3 \text{ m s}^{-1}$). Considera entre suas variáveis

meteorológicas, a radiação extraterrestre, temperaturas máximas, mínimas e a média diária.

2.4.4 Método de Priestley-Taylor

O método de Priestley-Taylor (1972) é um método físico, embasado no método original de Penman, sendo a melhor simplificação deste. Esse método considera que a ET resultante do poder evaporante do ar é uma porcentagem da ET condicionada pelo termo energético. Assim, a equação considera o balanço de energia, mas também possui um componente empírico (SENTELHAS & ANGELOCCI, 2009). Suas variáveis de entrada são: saldo de radiação, fluxo de calor no solo e temperatura do ar.

2.4.5 Método de Penman-Monteith Padrão FAO

O método de Penman-Monteith é o método considerado como padrão para definição e cálculo de evapotranspiração de referência, recomendado pela FAO. Além de incorporar os aspectos aerodinâmico e termodinâmico, a equação inclui a resistência da superfície ao fluxo de calor sensível e de vapor d'água. Por essa grandeza de fatores que englobam todas as variáveis climáticas que possam interferir na ET, ela é a equação mais complexa e completa em termos de cálculo de E_{To} , não tendo, ao contrário dos outros métodos indiretos, limitações de super- ou subestimação preocupantes de acordo com um clima para o qual ela não tenha sido adaptada. Apesar de mais preciso, as dificuldades relacionadas à medição ou estimativa das resistências levaram à necessidade de sua parametrização (ALLEN et al., 2006). Assim, a equação atualmente utilizada utiliza dados meteorológicos como saldo de radiação, fluxo de calor no solo, temperatura do ar e umidade relativa.

2.4.6 Comparação entre métodos de estimativa da E_{To}

O método do TCA é usado em inúmeros trabalhos, geralmente em comparação com outros métodos de estimativa de perda de água para manejo da irrigação e sua consequência na produtividade de determinada cultura. É o encontrado no trabalho de Pavani et al. (2008), que comparou tensiometria e o TCA no manejo de irrigação em dois sistemas de plantio: convencional e direto para feijão na região de Jaboticabal, SP.

Como resultados, o TCA estimou em média 21% a mais de perda de H₂O do que o tensiômetro, o que garantiu maior produtividade em sistema de plantio convencional. Já Medici et al. (2014) não encontraram diferenças significativas entre métodos de manejo de irrigação que faziam uso de TCA e irrigás (estrutura que utiliza tensiometria gasosa através de uma cápsula de cerâmica que permite a passagem do ar quando a tensão da água ultrapassa um valor crítico) para cultivo orgânico de alface na região de Seropédica, RJ. Sentelhas e Folegatti (2003) compararam dados do TCA a um lisímetro de pesagem e chegaram à conclusão de que o primeiro é uma boa alternativa para o manejo de irrigação da região de Piracicaba, SP.

Lacerda e Turco (2015) usaram as equações de Makkink, Hargreaves e Radiação Solar em comparação com a equação Penman-Monteith Padrão FAO para averiguação da sua adequação daquelas na região de Uberlândia, MG, concluindo que o método de Hargreaves teve os melhores resultados em relação ao Método Penman-Monteith Padrão FAO. Leão et al. (2013) avaliaram 6 diferentes métodos de estimativa de ETo para determinar o mais adequado para uso nas reservas hídricas do estado do Ceará, e concluíram que em comparação com o Método Penman-Monteith Padrão FAO, a equação de Priestley-Taylor teve melhor performance. Pilau et al. (2012) objetivaram comparar métodos mais simples para determinação da ETo com a equação Penman-Monteith Padrão FAO para as regiões de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões no estado do Rio Grande do Sul em escalas de 10, 15 e 30 dias, chegando à conclusão que o método de Makkink foi o mais adequado.

Silva et al. (2005) compararam o método de Thornthwaite-Camargo com a equação de Penman-Monteith Padrão FAO para verificação da influência de cada método sobre o dimensionamento de um sistema de drenagem na região de Piracicaba, SP. Uliana et al. (2011) tiveram por objetivo estimar a ETo por Penman-Monteith Padrão FAO através de uma análise de regressão dos valores obtidos pela equação de Thornthwaite-Camargo para a região de Colatina, ES.

Caporusso e Rolim (2015) consideraram que a equação de Makkink não deve ser desconsiderada para a região de Jaboticabal, SP quando comparada com Penman-Monteith Padrão FAO, apesar do método de Priestley-Taylor apresentar maior acurácia.

Segundo Gonçalves et al. (2009), a equação de Hargreaves-Samani foi a que obteve melhor índice de confiança para estimativa de ETo para Sobral, CE. Para Júnior

e al. (2012), este método obteve o segundo melhor desempenho para a região de Aquidauana, MS para estimativa da ETo.

Para Medeiros (2002), a equação de Priestley-Taylor apresentou um bom desempenho para a região de Paraipaba. Os bons resultados deste método foram atestados por López-Urrea et al. (2006), quando esta equação foi usada para estimativa de ETo em um clima semi-árido, onde, apesar de ter aferido os dados com uma subestimação considerável, foi o método mais adequado para cálculo da ETo média diária.

3 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho foi a comparação entre três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária e um método de estimativa da evapotranspiração mensal com o Método Penman-Monteith Padrão FAO.

Os objetivos específicos foram:

- a) Determinar a evapotranspiração diária pelos métodos de Hargreaves & Samani, Makkink e Priestley-Taylor, e determinar a evapotranspiração mensal através do Método de Thornthwaite-Camargo;
- b) Comparar os resultados das estimativas de ETo com o cálculo utilizando a equação de Penman-Monteith Padrão FAO;
- c) Classificar os métodos empíricos conforme desempenho para cálculo de evapotranspiração para região de Brasília-DF.

4 Material e Métodos

4.1 Descrição da área de coleta dos dados

Os dados usados nesse trabalho foram obtidos na estação meteorológica automática localizada na Fazenda Água Limpa, UnB - DF (latitude 15°56'S, longitude 47°56'W e altitude média de 1.080 m).

De 2001 a 2011, os dados foram obtidos de uma estação automática modelo Campbell Sci. Inc. As variáveis medidas foram: umidade relativa e temperatura do ar (termohigrômetro modelo HMP145, Vaisala), velocidade e direção do vento (anemômetro modelo 05103, Young), radiação solar global (piranômetro modelo LI200X, Licor) e precipitação (pluviômetro modelo TB4-L, Campbell Sci. Inc.). A estação era ligada a um coletor de dados modelo CR10X (Campbell Sci. Inc.), que armazenava dados horários.

A partir de 2012 a coleta de dados foi realizada através de uma estação meteorológica automática Maws 110 da Hobeco. As variáveis obtidas por essa estação e utilizadas neste trabalho são: umidade relativa e temperatura (termohigrômetro modelo HMP155, Vaisala), velocidade e direção do vento (anemômetro modelo WMS 302, Vaisala), radiação solar (piranômetro modelo SP Lite, Kipp-Zonen) e precipitação (pluviômetro modelo SMR 102, Hobeco).

4.2 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

Os valores de evapotranspiração foram estimados diariamente, a partir do dia 1 de janeiro de 2001 até o dia 31 de dezembro de 2014, excluindo-se os períodos em que não havia dados disponíveis em razão de falhas técnicas nas estações: de 1 de julho a 31 de dezembro de 2005, de 1 a 31 de dezembro de 2006 e de 16 de abril a 15 de julho de 2011.

As equações usadas para estimativa da ETo neste trabalho são: Thorthwaite-Camargo (CAMARGO et al., 1999), Hargreaves-Samani, (HARGREAVES & SAMANI, 1985), Makkink (MAKKINK, 1957), Priestley-Taylor (PRIESTLEY & TAYLOR., 1972) e Penman-Monteith Padrão FAO (ALLEN et al., 2006). As três primeiras equações apresentadas abaixo foram descritas em Pereira et al. (1997) e a última em Bernardo et al. (2006).

4.2.1 Método de Thornthwaite-Camargo (EToTC)

Thornthwaite (1948) desenvolveu uma fórmula para cálculo de evapotranspiração mensal que requeria como dado de entrada apenas a temperatura média mensal. Para adaptação desse método a climas tropicais, Camargo (1999) modificou a equação original para o uso da temperatura efetiva. A equação usada para cálculo da evapotranspiração mensal por esse método, *EToTC*, foi a indicada para locais com temperatura efetiva menor que 26,5°C, caso da região de Brasília no período usado:

$$EToTC = 16 \times \left(\frac{10 \times T_{ef}}{I} \right)^a \quad (1)$$

Em que:

T_{ef} é a temperatura efetiva (°C);

I é o índice térmico anual;

a é uma constante local em função de I ;

Neste método, a temperatura efetiva T_{ef} , a constante a , e o índice térmico I , são calculados conforme apresentado nas equações 2 a 4:

$$T_{ef} = 0,36 (3 T_{MAX} - T_{MIN}) \quad (2)$$

$$a = 0,49239 + 1,792 \times 10^{-2}I - 7,71 \times 10^{-5}I^2 + 6,75 \times 10^{-7}I^3 \quad (3)$$

$$I = 12 (0,2 \times T_A)^{1,514} \quad (4)$$

Em que:

T_{MAX} é a temperatura máxima média mensal (°C);

T_{MIN} é a temperatura mínima média mensal (°C);

T_A é a temperatura média anual (°C).

4.2.2 Método de Hargreaves & Samani (EToHS)

A equação utilizada para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Hargreaves-Samani (*EToHS*) foi a seguinte:

$$EToHS = 0,0023 Q_o (T_{max} - T_{min})^{0,5} \times (T_{med} + 17,8) \quad (5)$$

Em que:

Q_o é a radiação solar extraterrestre (mm d^{-1});

T_{max} é a temperatura máxima diária ($^{\circ}\text{C}$);

T_{min} é a temperatura mínima diária ($^{\circ}\text{C}$);

T_{med} é temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$).

Os valores médios mensais da radiação solar extraterrestre foram obtidos em tabela apresentada por Pereira et al. (1997).

4.2.3 Método de Makkink (EToMK)

Para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Makkink (*EToMK*), a equação utilizada foi a seguinte:

$$EToMK = 0,61 W R_s - 0,12 \quad (6)$$

Em que:

R_s é a radiação solar no nível da superfície (mm dia^{-1});

W é um fator de ponderação dependente da temperatura do bulbo úmido (T_u) e do coeficiente psicrométrico (γ).

O fator de ponderação W pode ser calculado a partir das equações de Wilson & Rouse (1972) e Viswanadhan et al. (1991):

$$W = 0,407 + 0,145 T_u , \text{ quando } 0 < T_u < 16^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$W = 0,483 + 0,01 T_u , \text{ quando } 16,1 < T_u < 32^\circ\text{C} \quad (8)$$

Para uso na equação de Makkink, Pereira et al. (1997) sugeriu a seguinte transformação de unidades para a radiação solar global, que foi usada neste trabalho:

$$Rs \text{ (mm d}^{-1}\text{)} = 0,0169 Rs \text{ (MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}\text{)} \quad (9)$$

Segundo Pereira et al. (1997), na ausência da temperatura de bulbo úmido, pode-se utilizar a temperatura média do ar (T_{med}), devendo-se considerar que em casos de atmosfera não saturada, $T_{med} > T_u$, os valores de W serão ligeiramente maiores. Essa substituição foi realizada nas estimativas realizadas pelo método de Makkink neste trabalho.

4.2.4 Método de Priestley-Taylor (EToPT)

No cálculo da evapotranspiração pelo método de Priestley-Taylor (*EToPT*) foi utilizada a seguinte equação:

$$EToPT = 1,26 W \frac{Rn-G}{\lambda} \quad (10)$$

Em que:

Rn é o saldo de radiação total diário ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

W é um fator de ponderação dependente da temperatura média do ar;

λ é o calor latente de vaporização da água a 20°C , igual a $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$.

No presente trabalho, o valor do fluxo de calor no solo foi assumido como sendo 3% do saldo de radiação. Na equação de Priestley-Taylor a constante 1,26 representa, em termos percentuais, a contribuição média do termo aerodinâmico.

4.2.5 Método de Penman-Monteith Padrão FAO (EToPM)

Para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith (*EToPM*), considerada como padrão neste trabalho, foi utilizada a equação parametrizada (Allen et al., 2006), denominada Penman-Monteith Padrão FAO, conforme descrito em Bernardo et al. (2006):

$$EToPM = \frac{0,408 \Delta (R_n + G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (11)$$

Em que:

Δ é a declividade da curva de pressão de vapor d'água em função da temperatura média diária (kPa °C⁻¹);

e_s é a pressão de saturação de vapor à temperatura média do ar (kPa);

e_a é a pressão atual de vapor (kPa);

γ é a coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹);

U_2 é a média diária da velocidade do vento medida a 2 m de altura (m s⁻¹).

O valor de γ utilizado neste trabalho foi obtido a partir da altitude da estação meteorológica e utilizando da tabela apresentada em Bernardo et al. (2006). Os valores de e_s e Δ foram calculados como descrito a seguir:

$$e_s = 0,6108 \left(\frac{17,27 T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right) \quad (12)$$

$$\Delta = \frac{0,408 e_s}{(T_{med} + 237)^2} \quad (13)$$

Como não foi possível obter medições de R_n , esta variável foi estimada seguindo a recomendação apresentada em Pereira et al. (1997), utilizando as equações a seguir:

$$Rn = Rns + Rb \quad (14)$$

Em que:

Rns é o saldo de radiação em ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

Rb é o saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

Os valores de Rns e Rb foram calculados pelas seguintes expressões:

$$Rns = (1 - \alpha)Rs \quad (15)$$

$$Rb = \sigma T^4 (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) (1,35 \frac{n}{N} - 0,35) \quad (16)$$

Em que:

α é o albedo, ou refletividade da superfície para a radiação solar (valor utilizado para a cultura de referência: 0,23);

σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($2,043 \times 10^{-10} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

T é a temperatura média diária (K);

n é o número de horas de insolação (h);

N é o fotoperíodo diário (h).

A estimativa de n , foi utilizada a média mensal normal para o período de 1961 a 1990 da insolação observada, apresentada em BRASIL (1992). O fotoperíodo diário foi calculado por:

$$N = 0,1333 \text{ acos } [- \tan \delta \times \tan \text{ lat }] \quad (17)$$

Em que:

lat é a latitude da estação meteorológica (em graus);

δ é o ângulo de declinação solar (em graus), calculado por:

$$\delta = 0,409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (18)$$

Em que:

J é o número do dia do ano de acordo com o calendário Juliano;

Todos os cálculos foram realizados com o auxílio do software Microsoft Office Excel ®.

4.3 Comparação entre os métodos

A comparação dos resultados foi realizada a partir da análise de desempenho dos demais métodos de estimativa de ETo em relação à equação universal padrão *EToPM*. Realizou-se a análise de correlação e regressão linear, através da geração de um gráfico para cada mês, para obtenção dos coeficientes linear (a) e angular (b) da equação do tipo $y = ax + b$, onde y é o método padrão de estimativa (*EToPM*, mm d⁻¹) e x é a ETo estimada por outro método (mm d⁻¹).

Além destes, foram obtidos: coeficiente de determinação da regressão linear (r^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) de Willmott et al. (1985), calculado pela expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O_i| + |O_i - O_i|)^2} \quad (19)$$

Em que:

P_i são os valores estimados pelos métodos propostos;

O_i são os valores estimados pelo Método Penman-Monteith Padrão FAO (*EToPM*);

O é a média dos valores estimados pelo Método Penman-Monteith Padrão FAO (ET_{oPM}).

O índice de concordância de Willmott varia de 0 (total discordância) a 1 (concordância perfeita).

A partir do cálculo de d e r , obtém-se o índice de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997), denominado índice de desempenho: $c = r \times d$. A partir dos resultados desse índice, os autores propuseram uma tabela de avaliação qualitativa (Tabela 1). Os parâmetros de comparação foram calculados para cada mês do ano.

Tabela 1. Índice de concordância, conforme proposto por Camargo e Sentelhas (1997).

Valor de "c"	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 - 0,85	Muito bom
0,66 - 0,75	Bom
0,61 - 0,65	Mediano
0,51 - 0,6	Sofrível
0,41 - 0,5	Mau
≤0,40	Péssimo

c - índice de concordância

5 Resultados e Discussão

5.1 Caracterização climática

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, Brasília tem clima Aw, tropical com estação seca no inverno (CARDOSO et al., 2014). Os dados de temperatura do ar e precipitação coletados durante o período deste trabalho foram comparados às Normais Climatológicas de Brasília (BRASIL, 1992), conforme pode ser observado nas Tabelas 2 e 3, a fim de se fazer uma caracterização climática do período.

Tabela 2. Comparação entre a temperatura média mensal medida na Fazenda Água Limpa no período em estudo e a Normal Climatológica para Brasília (INMET).

Mês	Tmed(°C) 2001-2014	Tmed (°C) Normal	Diferença
JAN	21,250	21,6	-0,350
FEV	21,229	21,8	-0,571
MAR	21,064	22,0	-0,936
ABR	20,571	21,4	-0,829
MAI	18,931	20,2	-1,269
JUN	17,654	19,1	-1,446
JUL	17,492	19,1	-1,608
AGO	18,915	21,2	-2,285
SET	20,992	22,5	-1,508
OUT	21,715	22,1	-0,385
NOV	21,215	21,7	-0,485
DEZ	21,342	21,5	-0,158

Em relação à temperatura média, o mês de agosto foi o mês com maior discrepância de temperatura em relação às normais. E em geral, as maiores diferenças de temperatura ocorreram no período seco, em que, nos 14 anos abrangidos por esse trabalho, os meses de maio a setembro foram os que tiveram maior amplitude térmica em relação a temperatura esperada, chegando a 2,285 °C de diferença no mês de agosto. A temperatura média anual em Brasília, segundo INMET é de 21,813 °C, enquanto que no período de 2001-2014, a média anual observada foi de 20,198 °C. Uma das razões levantadas para essa diferença de temperatura é o microclima da Fazenda Água Limpa; a presença de intensa de vegetação, a menor presença de materiais refletores de calor como os usados nas construções civis e a menor frequência de atividades produtoras de gases combustíveis de efeito estufa podem justificar essas diferenças. O sombreamento

e a evapotranspiração da vegetação reduzem o calor no ambiente, fazendo com que zonas rurais apresentem menores temperaturas em relação à zona urbana (NICODEMO & ODO, 2009).

Tabela 3. Comparação entre o total de precipitação mensal medido na Fazenda Água Limpa no período em estudo e a Normal Climatológica para Brasília (INMET).

Mês	Precip (mm) 2001-2014	Precip (mm) Normal	Diferença
JAN	211,686	241,4	-29,714
FEV	196,886	214,7	-17,814
MAR	235,379	188,9	46,479
ABR	113,571	123,8	-10,229
MAI	31,000	39,3	-8,300
JUN	5,077	8,8	-3,723
JUL	1,669	11,8	-10,131
AGO	10,969	12,8	-1,831
SET	33,231	51,9	-18,669
OUT	155,715	172,1	-16,385
NOV	224,077	238,0	-13,923
DEZ	234,825	248,6	-13,775

Da mesma forma que as temperaturas médias mensais, as precipitações totais mensais do período de 2001-2014 foram inferiores às normais climatológicas em todos os meses do ano, com exceção do mês de março. Neste mês, ocorreu um aumento da precipitação em relação ao valor normal, alcançando um aumento de 46 mm. Outra observação foi a diferença significativa de precipitação entre o período de seca no período estudado e a precipitação normal. Em junho e julho era esperada uma precipitação de 8,8 mm e 11,8 mm, enquanto que o observado durante os 14 anos foram precipitações de 5,077 mm e 1,669 mm, respectivamente.

5.2 Método de Thornthwaite-Camargo (EToTC)

Diferentemente dos outros métodos, *EToTC* é calculado mensalmente e, devido a essa peculiaridade, é um método pouco preciso para uso em tomadas de decisão de curto prazo. Para sua comparação com o método Penman-Monteith padrão FAO, foi feita a somatória mensal de *EToPM* e posteriormente a média de todos os meses durante

os anos observados. Não foram feitas, para esse método, as análises estatísticas apresentadas nas comparações seguintes. O resultado se apresenta na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de evapotranspiração mensal, calculado pelo método de Thornthwaite-Camargo (*EToTC*) e somatória dos valores diários calculados pelo método de Penman-Monteith Padrão FAO (*EToPM*), para a Fazenda Água Limpa no período de 2001 a 2014.

Mês	<i>EToTC</i> (mm)	<i>EToPM</i> (mm)	Diferença
JAN	121,047	99,762	21,285
FEV	128,830	90,510	38,314
MAR	125,447	89,896	35,551
ABR	128,872	79,694	49,179
MAI	129,751	78,104	51,647
JUN	130,314	70,717	59,597
JUL	136,645	78,448	58,198
AGO	156,578	109,896	46,682
SET	171,001	122,339	48,662
OUT	154,545	115,159	39,387
NOV	123,153	93,141	30,012
DEZ	117,777	93,839	23,938

Foi observada uma grande superestimativa de *EToTC* em relação a *EToPM*, bem como uma proporcionalidade direta entre as duas medidas, o que se justifica pela importância da temperatura para ambos os métodos. Em outros trabalhos *EToTC* tem tido bons resultados, sendo recomendado para o cálculo de ETo na ausência de outras variáveis. Conceição e Mandelli (2005) encontraram índice de desempenho “muito bom” na comparação desses dois métodos para Bento Gonçalves, RS.

5.3 Comparação entre os métodos de estimativa da ETo diária

A Tabela 5 apresenta os indicadores estatísticos testados na comparação entre o método Hargreaves-Samani estimativa da ET diária e método Penman-Monteith Padrão FAO.

Dentre os três métodos de avaliação diária, *EToHS* foi de pior desempenho superestimando ETo em relação a *EToPM*, o que é considerado esperado, sendo uma tendência do método de acordo com a literatura (Figuras 1 e 2). Seu índice de desempenho (c) foi classificado como “mau” e “péssimo” durante todos os meses do

ano. Seus melhores índice de determinação (r^2) foram registrados no período chuvoso (0,687 em janeiro, 0,709 em fevereiro, 0,615 em março, 0,638 em dezembro) o que significa que durante esse período, *EToPM* e *EToHS* tiveram dados menos discrepantes entre si. Uma possível explicação para esta observação foi levantada por Medeiros et al. (2002): em seus resultados, que também indicaram um desempenho ruim de *EToHS* para a região litorânea do Ceará, seria a menor variação de temperatura no período.

Tabela 5. Índices estatísticos para comparação entre o cálculo da ETo pelo método de Hargreaves-Samani (*EToHS*) e o método Penman-Monteith Padrão FAO: a: coeficiente linear; b: coeficiente angular; r^2 : coeficiente de determinação; r: coeficiente de correlação; c: índice de concordância; d: coeficiente de Willmott; classificação pelo índice c proposta por Camargo e Sentelhas (1997).

	a	b	r^2	r	c	d	Classificação
JAN	0,581	3,043	0,687	0,829	0,499	0,602	Mau
FEV	0,518	3,269	0,709	0,842	0,483	0,574	Mau
MAR	0,480	3,107	0,615	0,784	0,417	0,532	Mau
ABR	0,402	2,999	0,589	0,767	0,398	0,519	Péssimo
MAI	0,373	2,743	0,345	0,587	0,261	0,444	Péssimo
JUN	0,581	3,043	0,687	0,829	0,315	0,380	Péssimo
JUL	0,154	3,248	0,087	0,295	0,119	0,403	Péssimo
AGO	0,258	3,464	0,147	0,383	0,164	0,428	Péssimo
SET	0,367	3,647	0,360	0,600	0,337	0,561	Péssimo
OUT	0,542	3,256	0,583	0,764	0,495	0,649	Mau
NOV	0,506	3,341	0,595	0,771	0,427	0,553	Mau
DEZ	0,531	3,166	0,638	0,799	0,476	0,596	Mau

Para Gonçalves et al. (2009), *EToHS* apresentou índice de confiança com classificação “muito bom” (0,76) para a cidade de Sobral, CE; resultado semelhante foi encontrado para Pernambuco segundo Moura et al. (2013). A grande amplitude térmica dessas regiões foi usada como justificativa dos autores para a boa adaptabilidade desse método. A literatura em geral confirma a boa adaptação desse método para o nordeste brasileiros. Os resultados de Silva (2011) foram semelhantes aos deste trabalho para Monte Alegre de Minas, onde *EToHS* teve desempenho sofrível.

Segundo Palaretti et al. (2014), quando os valores de r^2 estão baixos, revela a necessidade de ajustes locais para que a fórmula seja mais eficiente em sua estimativa de ETo.

O cálculo da ETo pelo método de Makkink, *EToMK*, apresentou bons resultados em relação a *EToPM* (Tabela 6): seu índice de determinação (r^2) foi bem próximo a 1, o que indica a variabilidade dos dados desse método em relação a *EToPM* foi baixa. Além disso, seu índice de concordância (c) foi também bem próximo a 1 na maioria dos meses, exceto agosto e setembro (0,610 e 0,768, respectivamente). Nesses meses a ETo foi subestimada mais notavelmente, levando a um índice de desempenho com classificação “mediano” e “muito bom”, respectivamente, para esses meses e “ótimo” para os demais. Paiva (2016) também encontrou resultados satisfatórios para *EToMK* em Pirai do Sul -PR, sendo como um dos métodos recomendados para cálculo da ETo no local. Brixner et al. (2010) também recomenda a utilização do método de Makkink para cálculo do Índice de Seca no Rio Grande do Sul.

Tabela 6. Índices estatísticos para comparação entre o cálculo da ETo pelo método de Makkink (*EToMK*) e o método Penman-Monteith Padrão FAO: a: coeficiente linear; b: coeficiente angular; r^2 : coeficiente de determinação; r: coeficiente de correlação; c: índice de concordância; d: coeficiente de Willmott; classificação pelo índice c proposta por Camargo e Sentelhas (1997)

	a	b	r^2	R	c	d	Classificação
JAN	0,747	0,300	0,991	0,995	0,922	0,926	Ótimo
FEV	0,767	0,285	0,990	0,995	0,928	0,932	Ótimo
MAR	0,751	0,351	0,992	0,996	0,831	0,834	Muito Bom
ABR	0,767	0,368	0,989	0,994	0,947	0,952	Ótimo
MAI	0,749	0,447	0,969	0,984	0,932	0,947	Ótimo
JUN	0,774	0,513	0,942	0,971	0,924	0,951	Ótimo
JUL	0,693	0,578	0,902	0,949	0,860	0,906	Muito Bom
AGO	0,672	0,527	0,776	0,881	0,610	0,692	Mediano
SET	0,682	0,379	0,942	0,971	0,768	0,791	Muito Bom
OUT	0,655	0,490	0,880	0,938	0,813	0,866	Muito Bom
NOV	1,084	0,556	0,963	0,981	0,885	0,902	Ótimo
DEZ	0,734	0,309	0,989	0,994	0,917	0,922	Ótimo

Essa discrepância em relação a *EToMK* durante o inverno foi observada também por Vescove e Turco (2005) para a região de Araraquara-SP, que assim como Cavalcanti Júnior et al. (2011) perceberam que *EToMK* subestimava mais severamente a ETo para meses secos do que para meses úmidos. Segundo Palaretti et al. (2014), a subestimativa é uma característica do método de Makkink.

Na comparação, o método de Priestley-Taylor (*EToPT*), foi o de melhor precisão segundo os métodos estatísticos (Tabela 7). Segundo Pilau et al. (2012), o melhor

desempenho das equações de Priestley-Taylor e Makkink é explicado pelo fato de ambas utilizarem a radiação solar como dado de entrada, o que torna os métodos que utilizam mais precisos em relação a *EToPM*. A correlação entre *EToPM* e *EToPT* só foi menor que 70%, pelo coeficiente de determinação (r^2) no mês de junho, e teve um desempenho de correlação menor durante o período seco observado (junho-outubro), o que corresponde aos resultados de outros autores em diversas regiões para *EToPT*.

A observação dos gráficos ao longo dos meses permite confirmar essa tendência; durante o verão e início do outono, o coeficiente angular (b) é notavelmente menor que os outros meses, essa proximidade em relação à linha 1:1 indica forte semelhança de resultados entre os dois métodos. Com a chegada dos meses de inverno e primavera, é possível a observação de uma tendência ao aumento do coeficiente angular, levando ao distanciamento da linha de regressão de *EToPT* em relação a linha 1:1, que simboliza o comportamento ideal dos métodos. O aumento do coeficiente angular é acompanhado pelo decréscimo de desempenho dos outros índices, corroborando que a constatação que a acurácia de *EToPT* é menor no inverno.

Tabela 7. Índices estatísticos para comparação entre o cálculo da ETo pelo método de Priestley-Taylor (*EToPT*) e o método Penman-Monteith Padrão FAO. a: coeficiente linear; b: coeficiente angular; r^2 : coeficiente de determinação; r: coeficiente de correlação; c: índice de concordância; d: coeficiente de Willmott; classificação pelo índice c proposta por Camargo e Sentelhas (1997).

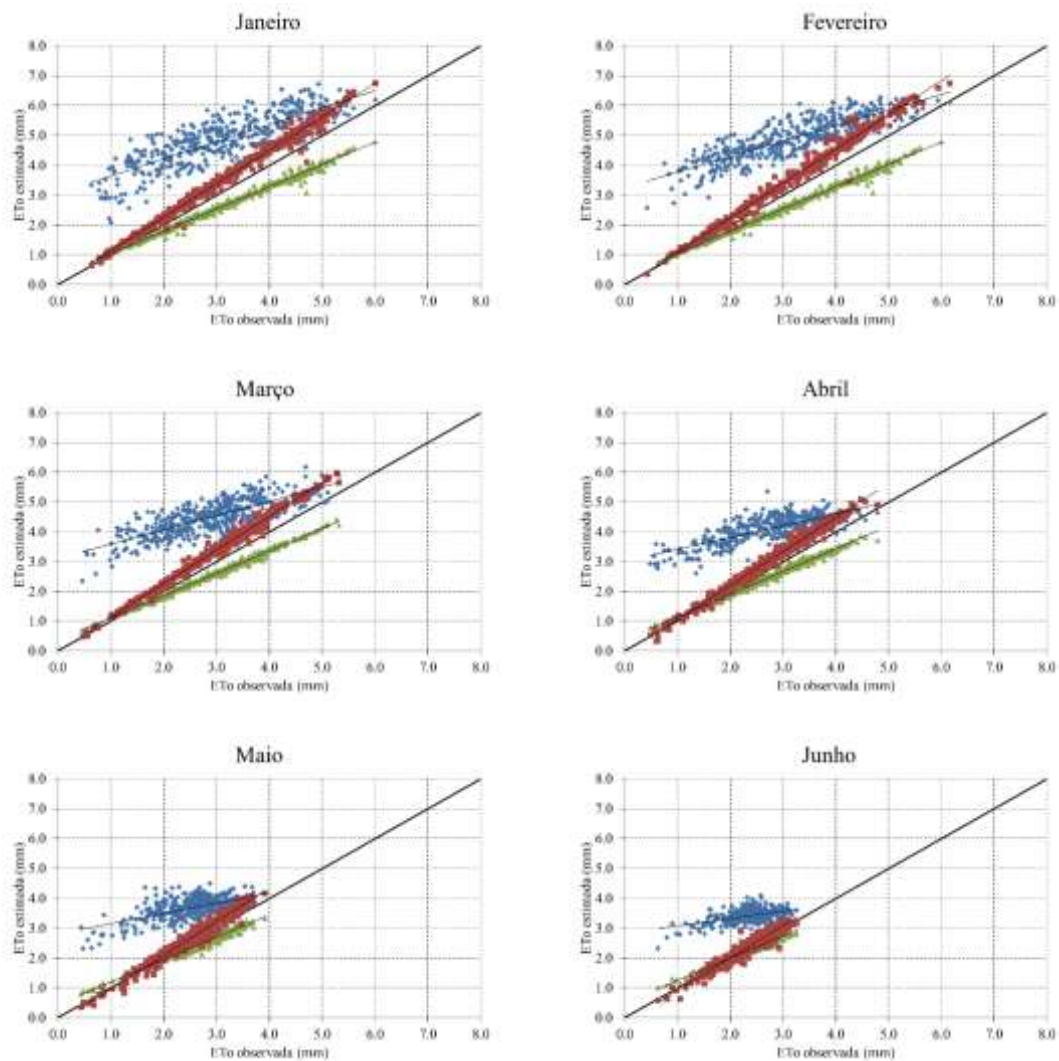
	a	b	r^2	r	C	D	Classificação
JAN	1,125	0,007	0,987	0,994	0,963	0,969	Ótimo
FEV	1,152	0,067	0,987	0,993	0,956	0,963	Ótimo
MAR	0,751	0,351	0,992	0,996	0,958	0,962	Ótimo
ABR	1,146	0,095	0,983	0,991	0,956	0,964	Ótimo
MAI	1,130	0,170	0,963	0,981	0,953	0,971	Ótimo
JUN	1,087	0,168	0,912	0,955	0,927	0,971	Ótimo
JUL	0,999	0,105	0,862	0,928	0,885	0,953	Ótimo
AGO	0,978	0,196	0,717	0,847	0,739	0,873	Bom
SET	0,972	0,123	0,912	0,955	0,921	0,965	Ótimo
OUT	0,949	0,266	0,859	0,927	0,911	0,983	Ótimo
NOV	0,719	0,328	0,975	0,987	0,959	0,971	Ótimo
DEZ	1,107	0,066	0,984	0,992	0,962	0,970	Ótimo

Júnior et al. (2013) classificaram *EToPT* como “Ótimo” utilizando o índice de desempenho “c”, para Aquidauana-MS; Caporusso e Rolim (2015) encontraram resultado semelhante, em que *EToPT* teve um desenvolvimento melhor no verão. Fialho

et al. (2007) em comparação com outros métodos concluíram que *EToPT* é o melhor método para estimativa da ETo para três localidades no Espírito Santo. Pereira et al. (2009) avaliaram *EToPT* como sendo “bom” para o período úmido e “péssimo” para o período seco na Serra da Mantiqueira, MG, em 2007 e 2008; neste mesmo trabalho é argumentado que essa regressão de desempenho se deve ao fato de que, com a superfície umedecida (período chuvoso), a energia da radiação seria convertida em calor latente de evaporação e no período seco, essa energia seria usada para aquecimento do ar, não incrementando à medida da evapotranspiração. Como a divisão entre períodos secos e chuvosos em Brasília-DF e na Serra da Mantiqueira-MG é semelhante, essa explicação pode justificar a variação encontrada neste estudo.

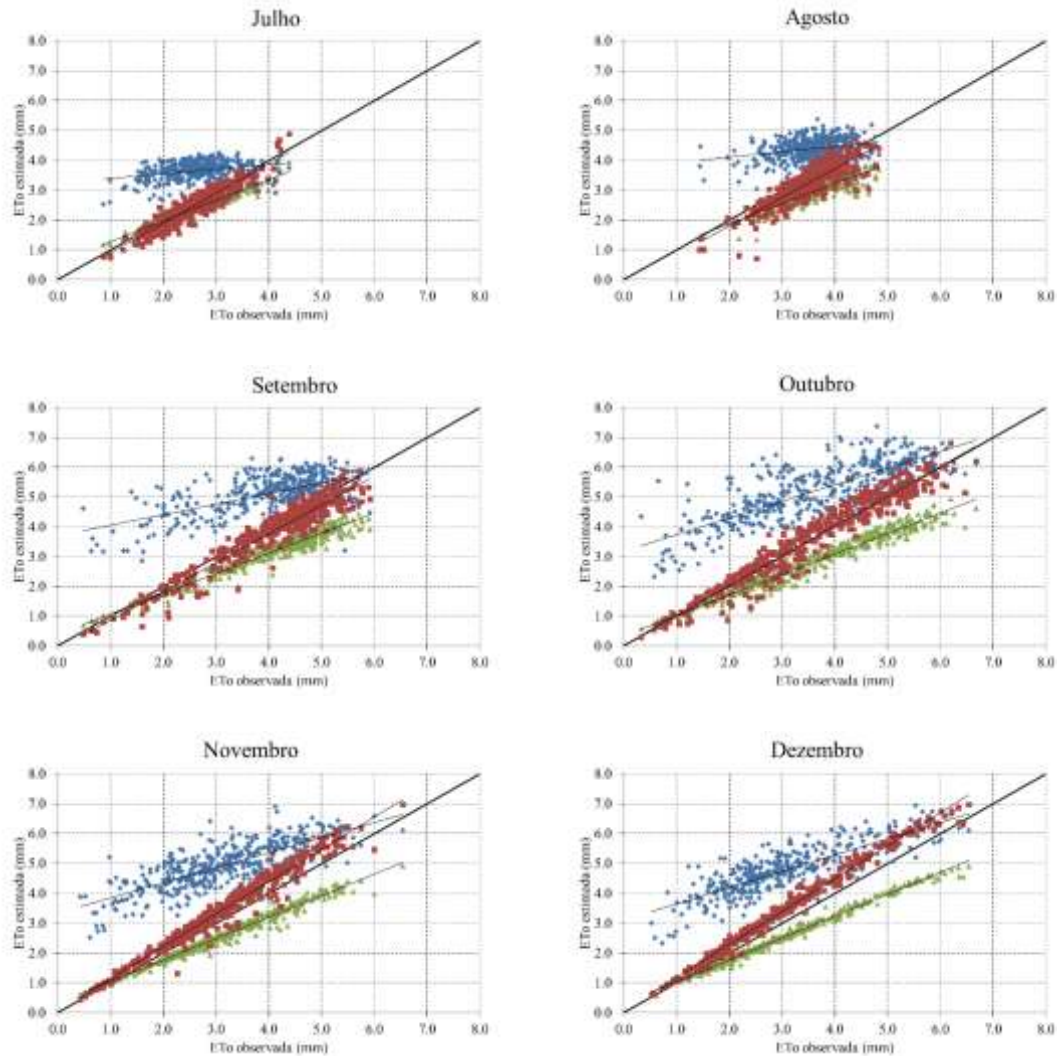
Em relação à regressão linear, observa-se que *EToPT* teve tendência a subestimativa mais perceptível nos meses de inverno e primavera (período seco) O comportamento do coeficiente angular de *EToPT* é semelhante ao de *EToMK*, sendo maior nos meses secos, no entanto, pela maior acurácia e precisão de *EToPT*, os coeficientes deste são significativamente menores. Observa-se também que no verão, a tendência do coeficiente de determinação (r^2), que avalia a variabilidade do método em relação ao padrão, é se aproximar de 1, o que evidencia a melhor precisão de *EToPT* nesse período.

É importante observar que na estimativa do saldo de radiação no presente estudo foi utilizado o número de horas de brilho solar médio mensal, obtido nas normais climatológicas do INMET (1961-1990). Esse fator pode ter conduzido a erros no cálculo dos valores de *EToPT* e também *EToPM*. Isso se fez notar em períodos quando a radiação global medida foi baixa –indicando dias de maior nebulosidade–que levaram à estimativa de valores incoerentes de R_n , levando a estimativas de *EToPT* e *EToPM* com valores muito pequenos e até mesmo negativos. Para evitar que esses dados interferissem excessivamente nas análises feitas neste estudo, não foram utilizadas as estimativas de ETo quando R_n estimado foi menor que 1, que correspondem aos dias com menor radiação não compatíveis com o número de horas de brilho solar diário.



◆ *EToHS* ■ *EToPT* ▲ *EToMK*

Figura 1. Correlações entre os valores da ETo observados (*EToPM*) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo (2001-2014), em mm dia^{-1} nos meses de janeiro a junho, para a região de Brasília, DF.



◆ *EToHS* ■ *EToPT* ▲ *EToMK*

Figura 2. Correlações entre os valores da *ETo* observados (*EToPM*) e estimados pelos métodos avaliados no período em estudo (2001-2014), em mm dia^{-1} nos meses de julho a dezembro, para a região de Brasília.

6 Conclusões

Por este trabalho conclui-se que:

1. O método de Priestley-Taylor é o mais adequado para o cálculo da evapotranspiração em Brasília-DF, tendo índice de desempenho classificado como “ótimo” na maioria dos meses, com exceção do mês de agosto, que tem índice classificado como “bom”, e em todo o período seco observa-se um desempenho menor em relação ao chuvoso.
2. O método de Makkink também tem ótimo desempenho para a região, podendo ser utilizado com boa margem de confiabilidade, tendo obtido índices de desempenho classificados como “ótimo” e “ muito bom” para maioria dos meses, com exceção do mês de agosto, que passa a ser classificado como “mediano”;
3. Apesar da queda de desempenho dos dois métodos acima no mês de agosto, seus índices estatísticos continuam satisfatórios e podem ser usados sem maiores ressalvas na falta de dados mais complexos;
4. O método de Hargreaves e Samani apresentou índice de desempenho classificado como “mau” e “péssimo” para todos os meses e não é aconselhável para aferição da evapotranspiração para região de Brasília-DF.

7 Referências Bibliográficas

ALLEN R. G.; PEREIRA L. S.; RAES D.; SMITH M.; **Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298p. (Estudio FAO Riego y Drenaje , 56).

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625p

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.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas (1961-1990)**. Brasília: 1992. 84p.

BRIXNER, G. F.; SCHÖFFEL, E. R.; TONIETTO, J. Determinação da evapotranspiração por diferentes métodos e sua aplicação no índice de seca na Campanha Gaúcha, Brasil. **Revista Brasileira Fruticultura**, p. 780–793, 2010.

CAMARGO, Â. P. Contribuição para a Determinação da Evapotranspiração Potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, p. 164–213, 1962.

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

CAPORUSSO, N. B.; ROLIM, G. D. S. Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, n. 1, p. 1–9, 2015.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Climatic Classification of Köppen-Geiger For the State of Goiás and Federal District. **Acta Geográfica**, v. 8, n. 16, p. 40–55, 2014. Disponível em: <<http://revista.ufrb.br/index.php/actageo/article/view/1384/1480>>.

CARVALHO, L. C. C.; BEZERRA, F. M. L.; CARVALHO, M. A. R. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de melancia sem sementes. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 39, n. 1, p. 53–59, 2007.

CAVALCANTI JÚNIOR, E. G.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Ciências Agrárias**, v. 32, n. 1, p. 1699-1708, 2011.

CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, p. 115–127, 2012.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da

evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Campinas, v.13, n.2, p. 303-307, 2005.

COSGROVE, C. E.; COSGROVE, W. J. **The Dynamics of Global Water Futures Driving Forces 2011 – 2050**, 2012.

CUNHA, P. C. R.; SILVEIRA, P. M; NASCIMENTO, J. L. et al. Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 2, p. 114–122, 2013.

EMERSON, J. A. GALBIATTI, L. C. P. Níveis de irrigação e de composto de lixo orgânico na formação de mudas cítricas em casa de vegetação. **Engenharia Agrícola**, p. 578–588, 2004.

FERREIRA, J. O. P. Evapotranspiração e coeficientes de cultura da melancia irrigada por gotejamento em Alvorada do Gurguéia-PI. **Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP**, 103 p., 2010.

FIALHO, E. BRAGANÇA, R. G. OLIVEIRA, PEZZOPANE, J. E. M, TAGLIAFERRE. C. Estudo Comparativo Da Estimativa Da Evapotranspiração De Referência Para Três Localidades Do Estado Do Espírito Santo No Período Seco. **IDESIA (Chile)**, v. 25, p. 75–84, 2007.

GONÇALVES, F. M.; FEITOSA, H. de O.; CARVALHO, C. M. de et al. Comparison of methods for estimating the evapotranspiration of reference for the city of Sobral-CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 3, n. 2, p. 71–77, 2009.

JÚNIOR, E. D. F.; LOPES, A. da S; OLIVEIRA, G. Q. de et al. Métodos Empíricos para Estimativa da Evapotranspiração de Referência para Aquidauana, MS. **Irriga**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

KASHYAP, P. S.; PANDA, R. K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 9-25, 2001.

LACERDA, Z. C.; TURCO, J. E. P. Estimation methods of reference evapotranspiration (ET_o) for Uberlândia-MG. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 1, p. 27–38, 2015.

LEÃO, R. A. de O; SOARES, A. A.; TEIXEIRA, A. dos; SILVA, D. D. da. Estimation of evaporation in the Banabuiu dam, in the state of Ceará, Brazil, by different combined methods, derived from the Penman equation. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p. 129–144, 2013.

LÓPEZ-URREA, R.; OLALLA, F. M. S.; SAKAI, E.; et al. Testing a evapotranspiration equation using lysimeter observations in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, 85, p, 5-26, 2006.

MACEDO, M. F. S. Técnicas de irrigação, o desenvolvimento da agricultura e do agronegócio: Uma análise à luz da proteção humana e da cidadania frente à crise hídrica nacional. **Campo Jurídico**, v. 3, n. 2, p. 39–54, 2015.

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. **Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo**, p. 103, 2002.

MEDICI, L. O.; ALMEIDA, W. S. de; CARVALHO, D. F. de et al. Irrigação no cultivo orgânico de alface utilizando Irrigás, tanque Classe A e um sistema automático de baixo custo Irrigation with Irrigás, Class A pan and an low cost controller in the organic. **Ciência Rural**, p. 1950–1955, 2014.

MELO, T. K. de; MEDEIROS, J. F.; SOBRINHO, J. E. et al. Evapotranspiration and crop coefficients of melon plants measured by lysimeter and estimated according FAO 56 methodology. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 5, p. 929–939, 2013.

MONTEITH, J.L., 1965. Evaporation and Environment. **19th Symposia of the Society for Experimental Biology**, 19. University Press, Cambridge, pp. 205–234.

MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D. et al. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no Estado de Pernambuco - Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 181–191, 2013.

NICODEMO, M. L. F.; ODO, P. Por que manter árvores na área urbana? **Documentos EMBRAPA**, p. 40, 2009. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br>>. .

PAIVA, C. M. de S.; PINHEIRO, A. da S. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo da irrigação. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 42–51, 2016.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões citrícolas Paulistas. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 38–47, 2014.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Análise da sensibilidade dos componentes da equação de Hargreaves-Samani para a região de Bebedouro - SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 2, p. 299–306, 2014.

PAVANI, L. C.; LOPES, A. S.; GALBEIRO, R. B. Manejo da irrigação na cultura do feijoeiro em sistemas plantio direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 1, p. 12–21, 2008.

PEREIRA, D. dos R.; YNAGI, S. de N. M.; MELLO, C. R. de et al. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2488–2493, 2009.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia, fundamentos e Aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. 1.ed. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PILAU, F.G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; RIGHI, E.Z. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões - RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.2, p.283-290, 2012. .

SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. Irrigação. Piracicaba: Funep, 2001. p. 63-120.

SENTELHAS, P.C.; Folegatti, M.V. 2003. Classe A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 7(1): 111-115.

SILVA, K. O.; MIRANDA, J. H. de; DUARTE, S. N. et al. Análise de métodos de estimativa de evapotranspiração na otimização de sistemas de drenagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 1966, p. 161–165, 2005.

SILVA, V.J.; CARVALHO, H.P.; SILVA, C.R. et al. 2011. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Monte Alegre de Minas-MG. In: **XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, Guarapari, 2011.

SOUZA, L.S.B.; MOURA, M.S.B.; SILVA, T.G.F. et al. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Petrolina-PE. In: **XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA** Guarapari, 2011.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. 1985. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5. p. 8995-9005.

WILSON, R.G.; ROUSE, W.R. Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.11, n.11, p.436-42, 1972

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: 2006. Versão Digital, 443p

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara - SP. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 713–721, 2005.

VISWANADHAM, Y.; SILVA FILHO, V.P.; ANDRE, R.G.B. The Priestley-Taylor parameter for the Amazon Forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.38, n.3-4, p.211-25, 1991

