

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA REGIÃO DE JABOTICABAL-SP**

Lucas Hordones Chaves
Engenheiro Agrônomo

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA REGIÃO DE JABOTICABAL-SP**

Lucas Hordones Chaves

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

**Dissertação apresentada à Faculdade
de Ciências Agrárias e Veterinárias -
UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte
das exigências para a obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)**

2015

C512c Chaves, Lucas Hordones
Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de
referência para a região de Jaboticabal-SP / Lucas Hordones Chaves.
-- Jaboticabal, 2015
vi, 58 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015
Orientador: José Eduardo Pitelli Turco
Banca examinadora: Humberto Vinicius Vescove, Teresa Cristina
Tarlé Pissarra
Bibliografia

1. Integridade dos dados. 2. Manejo da irrigação. 3. Penman-
Monteith. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias.

CDU 631.67

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

Certificado de Aprovação

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

LUCAS HORDONES CHAVES – Nascido em 19 de setembro de 1989, em Uberaba- MG. Filho de Vanderlei Faria Chaves e Rosimar Miranda Hordones. Graduado em Engenharia Agrônoma, em agosto de 2013, pelo Instituto Federal do Triângulo Mineiro. Ingressou, em agosto de 2014, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista. Concluiu o Mestrado em 27 de novembro de 2015.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu pai, Vanderlei Faria Chaves, pelo seu exemplo de humildade e dedicação. À minha mãe, Rosimar Miranda Hordones, por tudo que significa para mim.

Ofereço este trabalho a todos que fazem parte da minha vida, pela presença,
apoio e estímulo.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP-Jaboticabal), pela oportunidade de realização do curso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo pela condução do projeto de mestrado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro – IFTM, pelo apoio a realização do mestrado em concomitância ao trabalho.

Ao professor José Eduardo Pitelli Turco, pela orientação durante a realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, pelos ensinamentos e lições de vida.

Aos amigos, pela atenção, estímulo e convívio.

Aos colegas da pós-graduação e demais colegas de pelo incentivo.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Página

RESUMO	iii
ABSTRACT -	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Evapotranspiração de referência	3
2.2 Método de estimativa da evapotranspiração de referência padrão da FAO.....	6
2.3 Comparação e escolha de métodos de estimativa da ET_0	7
2.4 Aquisição automática de dados e integridade dos dados	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Área experimental e dados metereológicos	16
3.2 Integridade dos dados	17
3.2.1 Radiação Solar.....	18
3.2.2 Umidade do Ar	20
3.2.3 Velocidade do Vento.....	21
3.2.4 Temperatura do Ar e Precipitação Pluviométrica.....	22
3.3 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.....	23
3.3.1 Método Makkink (M)	23
3.3.2 Método de Hargreaves (Har)	23
3.3.3 Método Hargreaves-Samani (HS)	24
3.3.4 Método de Camargo (CM)	24
3.3.5 Método de Jensen-Haise (JH)	24
3.3.6 Método do Penman-Monteith (PM)	25
3.4 Avaliação dos dados.....	25
3.5 Técnica de determinação de erros (desvios padrões) desenvolvida por Turco et al. (1994)	27
3.6 Avaliação dos dados utilizando metodologias de análise de erros (desvios	

padrões) da ETo	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Integridade dos Dados	34
4.2 Avaliação dos dados dos médios da ETo	38
4.3 Avaliação dos desvios padrões da ETo	42
5 CONCLUSÕES	46
6 REFERÊNCIAS	47

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA REGIÃO DE JABOTICABAL-SP

RESUMO - A estimativa da evapotranspiração de referência é de suma importância para o manejo da irrigação. A FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) recomenda a utilização do método de Penman-Monteith, para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o). Esse método apresenta um nível de exigência de dados de entrada que dificulta sua aplicação, uma vez que tais elementos meteorológicos nem sempre encontram-se disponíveis em algumas regiões. Com este trabalho o objetivo foi verificar a eficiência de métodos que utilizam apenas a medição da temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência comparando com o método de Penman-Monteith, nas condições climáticas do município de Jaboticabal – SP. Foram utilizados dados médios diários dos anos de 2009 a 2014 de radiação solar global, velocidade do vento, temperatura do ar e umidade relativa do ar obtido em uma estação meteorológica automática. Os métodos avaliados para estimativa da ET_o foram Hargreaves, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink, Camargo e Penman-Monteith. A análise dos resultados foi realizada aplicando técnicas que verificam a integridade dos dados meteorológicos para estimativa da ET_o e utilizando metodologias de análise dos dados médios e desvios padrões da ET_o. A integridade dos dados meteorológicos foi aceitável conforme os critérios adotados. O resultado de avaliação dos métodos, utilizando a metodologia de análise de desvios padrões diários da ET_o, indica que uma relação linear foi determinada, portanto, podem ser comparados. A conclusão de avaliação dos métodos, utilizando a metodologia de análise dos dados médios da ET_o, mostra que o método Hargreaves-Samani apresentou o melhor ajuste para a estimativa da ET_o.

PALAVRAS-CHAVE: Integridade dos dados, Manejo da Irrigação, Penman-Monteith

COMPARATION OF METHODS FOR ESTIMATION REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR THE MIDDLE OF JABOTICABAL - SP

ABSTRACT - The estimation of reference evapotranspiration is extremely important for the irrigation management. The FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) recommends using the Penman-Monteith method to estimate the reference evapotranspiration (ET_o). This method presents an input data demand level that hinders its application, since these meteorological variables are not always available in some regions. With this work, the objective was to verify the efficiency of methods using only the air temperature measurement to estimate the reference evapotranspiration compared with the Penman-Monteith method, in the climatic conditions of Jaboticabal – SP. Average daily data were used between the years 2009 and 2014 of the global solar radiation, wind speed, air temperature and relative humidity obtained in an automatic weather station. The methods evaluated to estimate ET_o were Hargreaves, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Makkink, Camargo and Penman-Monteith. The results analysis was performed by applying techniques that verify the integrity of meteorological data to estimate ET_o and using analysis methodologies of average data and standard deviations of ET_o. The integrity of the meteorological data was acceptable according to the adopted criteria. The result of the evaluation methods, using the analysis methodology of daily standard deviations ET_o indicates that a linear relationship was established, therefore they can be compared. The conclusion of assessment methods, using the analysis methodology of average data of ET_o, demonstrates that the Hargreaves-Samani method showed the best fit to estimate ET_o.

KEYWORDS: Data Integrity, Management of Irrigation, Penman-Monteith.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Valores do coeficiente de confiança e sua classificação.....	25
Tabela 2.	Valores do coeficiente de correlação e sua classificação.....	25
Tabela 3.	Valores do coeficiente de correlação (r), de concordância (d) e de confiança (índice c), com radiação solar estimada	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estação Meteorológica Automática da marca Davis Instruments	16
Figura 2. Estação Meteorológica Automática da marca Campbell Scientific	17
Figura 3. Gráfico que relaciona V com x_{red}^2 (VUOLO, 1996)	33
Figura 4. Radiação solar medida pela estação meteorológica automática da DAVIS e Radiação Solar estimada por três equações das técnicas descritas por Allen (1996).....	34
Figura 5. Soma acumulativa da Velocidade do Vento das estações meteorológicas de Referência e da Davis	35
Figura 6. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica da Davis	36
Figura 7. Soma acumulativa da Temperatura Mínima das estações meteorológicas de referência e da Davis	36
Figura 8. Soma acumulativa da Temperatura Máxima das estações meteorológicas de referência e da Davis.	37
Figura 9. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Hargreaves, em relação ao Penman-Monteith	38
Figura 10. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Hargreaves-Samani, em relação ao Penman-Monteith	39
Figura 11. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Makkink, em relação ao Penman-Monteith	39
Figura 12. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Camargo, em relação ao Penman-Monteith	40
Figura 13. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Jensen-Haise, em relação ao Penman-Monteith	40
Figura 14. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Hargreaves, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas	43
Figura 15. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Hargreaves-Samani, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas	43
Figura 16. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Makkink, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas	44
Figura 17. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Camargo, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas	44
Figura 18. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Jensen-Haise, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas	45

1 INTRODUÇÃO

A demanda por água doce aumenta, devido ao desenvolvimento econômico e populacional, tanto para a produção de alimentos como para consumo urbano e industrial. A potencial escassez da água exige um uso racional. Sendo um recurso finito pode ocorrer, em alguns locais, a diminuição das reservas de água de boa qualidade, inviabilizando determinados usos. A demanda hídrica para a agricultura é um fator crítico, pois segundo Christofidis (2001), 70% do consumo de água das atividades humanas são destinados às práticas de irrigação no setor agrícola.

A utilização da irrigação é uma alternativa para aumento da produção de culturas e o manejo da irrigação agrícola é de suma importância para reposição adequada e racional de água, desde o projeto de irrigação, gerenciamento de reservatórios e planejamento de uso e outorga de recursos hídricos. O manejo da irrigação começa pela estimativa das perdas por evaporação e transpiração – evapotranspiração (ET_o) .

A evapotranspiração é a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor. Esse processo envolve a evaporação da água de superfícies de água livre (rios, lagos, represas, oceanos, etc.) dos solos e da vegetação úmida e a transpiração dos vegetais. Os métodos diretos são pouco práticos e envolvem altos custos. Então, pode-se utilizar os métodos de estimativa para obter a evapotranspiração em diferentes situações e locais.

Os métodos para a estimativa da evapotranspiração são utilizados para estimar a quantidade de água vaporizada de uma área em um certo tempo e determinados por correlações de dados meteorológicos: saldo de radiação, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento.

O método de Penman-Monteith (FAO 56), que é considerado como padrão, requer grandes quantidades de dados meteorológicos. Outros métodos são de menor exigência de dados e são comparados com o de Penman-Monteith em cada região. Nem sempre os produtores rurais dispõem desses dados. Assim, os métodos que necessitam apenas da verificação de dados de temperatura se tornam mais práticos.

Para a comparação dos métodos ser confiável torna-se necessário a

integridade dos dados utilizados, pois equipamentos de registro de dados podem sofrer mudanças no funcionamento e/ou problemas de calibração dos instrumentos podem ocorrer ao longo do tempo. Recomenda-se, então, avaliar a qualidade dos dados e se for aceitável fazer a comparação dos métodos.

O objetivo deste trabalho foi verificar a eficiência de métodos que utilizam apenas a medição da temperatura do ar, para a estimativa da evapotranspiração de referência comparando com o método FAO56 Penman-Monteith, nas condições climáticas do município de Jaboticabal – SP.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração de referência

O conceito de evapotranspiração - ET foi mencionado pela primeira vez por Warren Thornthwaite em 1944, como a ocorrência simultânea dos processos de evaporação e transpiração, numa superfície vegetada (CAMARGO, 1962).

De acordo com Sedyama (1998) a preocupação principal no conceito proposto por Thornthwaite era explicar as variações sazonais do balanço de água no solo e tentar definir as diferenças regionais do clima. Assim, a sua equação era apenas uma proposta de estimativa da evapotranspiração em função da temperatura média do ar a partir de um índice térmico anual e do comprimento do dia para um determinado mês do ano. Falta a este método o entendimento da razão da evapotranspiração correspondente a uma dada temperatura não ser a mesma para diferentes locais.

Howard Penman, em 1948, apresenta um modelo envolvendo os processos físicos da evaporação que resulta em um método que proporciona a estimativa da taxa de evaporação da água livre, da umidade da superfície do solo ou da vegetação, para ser estimada a partir dos elementos climáticos relevantes: energia radiante, temperatura, umidade e velocidade do vento (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Nesse método Penman combinou o balanço de energia na superfície com um termo aerodinâmico, cuja equação resultante é conhecida como equação combinada ou equação original de Penman (SEDIYAMA, 1996).

A taxa de evapotranspiração refere-se à combinação da evaporação direta da água livre, da umidade da superfície do solo e da transpiração através das plantas para a atmosfera (SEDIYAMA, 1996).

A evapotranspiração é uma das principais variáveis do ciclo hidrológico. É um elemento climatológico fundamental que corresponde ao processo oposto à chuva sendo controlada pelo balanço de energia, pela demanda atmosférica, pelo suprimento de água do solo à vegetação e pelas características fisiológicas das plantas (MENDONÇA et al., 2003, PEREIRA et al., 1997).

O termo evapotranspiração de referência – ET_0 foi introduzido nos anos 1970.

Segundo Jensen (1973), a ET_0 é aquela que ocorre numa cultura padrão, no caso a alfafa, com altura entre 0,3 e 0,5 m numa dada condição climática e com cerca de 100 m de área tampão na direção dos ventos predominantes. Ainda nos anos 1970 pesquisas na área de modelagem da evapotranspiração para uma cultura em crescimento com cobertura incompleta foram desenvolvidas resultando em modelos em que a evaporação direta da água do solo e a transpiração ocorriam separadamente, especialmente para pequenos valores de índice de área foliar, quando a evaporação direta da água do solo constitui a maior parte da evapotranspiração total (TANNER; JURY, 1976).

Doorenbos e Pruitt (1977), definiram como ET_0 a evapotranspiração que ocorre em uma extensa área de grama com altura de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo o solo e sem restrição hídrica. Sob estas condições e, considerando-as invariáveis no tempo e espaço, a transferência de água do sistema solo-planta para atmosfera ocorre como função apenas do balanço vertical de energia, ou seja, das condições atmosféricas sobre a vegetação, sem interferências advectivas, podendo ser estimada por modelos matemáticos, técnico-empíricos desenvolvidos e testados para várias condições climáticas.

O ideal seria que um método para estimar a ET_0 incorporasse todos os fatores que influenciam a evapotranspiração, tais como a morfologia da planta, a taxa de crescimento da cobertura da superfície pela planta, estágio de crescimento, condições de solo, principalmente a forma com que as propriedades físicas do solo afetam diretamente a água disponível para a extração pelo sistema radicular e, também, as condições microclimáticas nos aspectos dos processos de transferência de energia e massa (CUENCA; NICHOLSON, 1982).

De acordo com Allen et al. (2006) a evapotranspiração de referência é definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23, com altura uniforme, sem restrições de água, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo.

Vários modelos de balanço hídrico são empregados com a finalidade de dimensionar e manejar a agricultura irrigada ou estudar as probabilidades de ocorrências de estiagens ou excessos hídricos (BACK, 2007). Nesses modelos

utilizam-se, em geral, como entrada de água no sistema a precipitação e a irrigação e, como principal saída a evapotranspiração. Dados de precipitação podem ser obtidos com relativa facilidade. Entretanto, existe carência de informações sobre evapotranspiração das culturas, principalmente pelas dificuldades de mensuração. Frequentemente a evapotranspiração das culturas é estimada com base nos valores da evapotranspiração de referência e no coeficiente de cultura.

O conceito de evapotranspiração de referência foi originalmente introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, fenologia e tratos culturais. É um termo usado em estudos climáticos e um elemento indicativo da demanda hídrica das culturas de um determinado local e período (ALENCAR et al., 2011). O conhecimento das necessidades hídricas das culturas é de grande importância para o estudo do manejo da água utilizada na agricultura irrigada. E a quantificação da evapotranspiração é imprescindível para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação (ORTEGA-FARIAS; IRMAK; CUENGA, 2009).

Ao longo dos anos, de acordo com Carvalho et al. (2011), muitos métodos foram desenvolvidos para a estimativa da evapotranspiração de referência. Três importantes razões concorreram para isto: adequação do método às condições climáticas da região, simplicidade de uso e limitação de elementos meteorológicos ou climatológicos que alimentam estes métodos. Devido à diversidade de métodos existentes, em razão da grande variabilidade dos parâmetros que influenciam o fenômeno e, também considerando o empirismo de muitos deles é comum haver pesquisas para avaliar o método que tem maior aplicabilidade ao local de estudo.

A evapotranspiração de referência (ET_o) ou evapotranspiração potencial (ET_p) é um parâmetro agrometeorológico indispensável para o planejamento e manejo de irrigação e também é considerada elemento de balanço hídrico, daí sua aplicação em estudos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos (CARVALHO et al., 2011).

2.2 Método de estimativa da evapotranspiração de referência padrão da FAO

Os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência podem ser classificados em: de radiação, de evaporação, de temperatura, de umidade, de múltiplas correlações e combinados (PEREIRA et al., 1997). Assim, dependendo dos princípios envolvidos no desenvolvimento do método de estimativa da ET_0 , tais podem ser agrupados em categorias: empíricos, aerodinâmicos, baseados no balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões.

Existem mais de 50 modelos de métodos de determinação da evapotranspiração encontrados na literatura. A estrutura de tais modelos está relacionada com a complexidade do fenômeno natural que depende de uma vasta gama de dados climáticos (McMAHON et al., 2013). Ainda muitos destes métodos contam com variantes, por questões de ajustes e calibrações locais, elevando ainda mais, a quantidade de métodos disponíveis.

O método FAO Penman-Monteith (PM-FAO), no qual se emprega o conceito de cultura hipotética, com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23, sem restrições de umidade, crescendo ativamente e cobrindo completamente a superfície do solo, é recomendado por Allen et al. (1998).

O método PM-FAO é amplamente utilizado porque facilita o entendimento dos processos físicos da evaporação de superfícies naturais e, também, porque utiliza informações meteorológicas coletadas em um único nível acima da superfície evaporante. Esse método é classificado como um método combinado, pois associa os efeitos do balanço de energia e dos termos aerodinâmicos na estimativa da evapotranspiração (JABLON; SAHLI, 2008).

O uso de dados climáticos médios, em métodos combinados, ou seja, envolvendo os componentes aerodinâmico e radioativo, como é o caso do método PM-FAO pode conduzir a erros, resultante das combinações entre os elementos climáticos. O método PM-FAO pode também, variar bastante, quanto a estimativa do saldo de radiação, quando não se dispõe de medições, o que foi estudado por Turco, Faria e Fernandes (2005) em Jaboticabal – SP. Esses autores verificaram que, caso a estimativa do saldo de radiação não seja calibrada, a evapotranspiração de referência pode ser superestimada em até 27%.

A determinação da evapotranspiração de referência utilizando métodos combinados tende a superestimar a ET_0 , um pouco em regiões áridas e muito em regiões úmidas Allen et al. (1989). Por sua vez, Gavilán, Berengena e Allen (2007), na Espanha realizaram estudos incluindo estimativas e medições de saldo de radiação e fluxo de calor do solo, em regiões semi áridas verificando que estes parâmetros podem apresentar consideráveis diferenças quando a estimativa da ET_0 ocorre na escala horária. Já na escala diária, não foram observadas diferenças significativas, considerando-se que as estimativas de saldo de radiação e fluxo de calor no solo são confiáveis.

Segundo Allen et al. (2006) devido a comprovada precisão do método PM-FAO, este é o mais recomendado para utilização como padrão de comparação com outros métodos.

Embora tenham sido verificada consistência e ótimo desempenho deste método, o requerimento de um conjunto amplo de dados impõe obstáculos à sua difusão, principalmente aos pequenos produtores, para os quais os custos de aquisição de estações meteorológicas automáticas são muito altos. Quando uma base mais ampla de dados meteorológicos não é acessível, torna-se necessário o emprego de métodos com menor requerimento de dados (BORGES JÚNIOR et al., 2012).

2.3 Comparação e escolha de métodos de estimativa da ET_0

Antes de aplicar um método para determinado local, é necessário verificar o desempenho deste método e, quando necessário, fazer calibrações para minimizar os erros de estimativa. Esse desempenho tem sido analisado com a comparação dos métodos em estudo ao método de PM-FAO (CONCEIÇÃO; MANDELLI, 2005).

A escolha dos métodos de estimativa da evapotranspiração varia conforme a sua aplicação e as necessidades de precisão e duração dos períodos de cálculo. Em pesquisas para o manejo da irrigação são requeridos períodos curtos, de 1 a 10 dias no máximo, dependendo do sistema de irrigação e da condição do meio (MACHADO; MATOS, 2000).

É de grande importância o conhecimento dos métodos com menor variável de

estimativa da evapotranspiração de referência, que demandam dados de fácil obtenção e baixo custo (BONOMO, 1999). Alguns modelos de estimativa da evapotranspiração de referência são precisos, no entanto, requerem quantidade expressiva de elementos meteorológicos, como o método PM-FAO. Os produtores rurais, em manejo de irrigação nem sempre dispõem de dados meteorológicos, para a utilização de métodos mais complexos de estimativa da ET_0 , sendo necessária a utilização de métodos mais simples (CONCEIÇÃO, 2010). No entanto, tais métodos devem ser comparados ao de PM-FAO e talvez calibrados para locais específicos, de modo a fornecerem resultados mais confiáveis (MOHAWESH, 2010).

Os métodos que utilizam apenas a inserção da temperatura do ar têm sido frequentemente usados e recomendados, devido à simplicidade dos cálculos e por exigirem poucos dados de entrada e de fácil obtenção (KHOOB, 2008).

A confiabilidade da estimativa da evapotranspiração de referência, pelos métodos considerados simples pode ser definida pelo seu grau de aproximação com o valor estimado pelo método padrão PM-FAO. Vescove e Turco (2005), ao analisarem, para Araraquara – SP, nos períodos verão-outono e inverno-primavera, os métodos PM-FAO, Tanque Classe A, Radiação Solar e Makkink, observaram que o método de Makkink subestimou a ET_0 , no período inverno-primavera, mais que no outro período.

Fernandes et al. (2012) concluíram que o método Hargreaves (Har) para estimar a ET_0 diária por meio de coeficientes empíricos de maneira local e regional, pode ser uma alternativa para locais onde a disponibilidade de dados climáticos é limitada.

Chauhan e Shrivastava (2009) compararam o desempenho de métodos indiretos em relação ao método PM-FAO para a região do reservatório de Mahanadi, na Índia e, chegaram às correlações significativas e importantes para a aplicação desses métodos, em condições menos favoráveis em termos de disponibilidade de dados. Observa-se, portanto, que a análise estatística do desempenho de métodos mais simples em relação ao método PM-FAO consiste de um estudo relevante para aplicação mais precisa ao manejo de irrigação, à simulação hidrológica e à análise climática de uma determinada região.

Avaliando a evapotranspiração de referência, estimada por vários métodos,

para Mossoró – RN, Dantas Neto (1999) observou que os resultados das comparações entre as estimativas de ET_0 indicam um melhor ajuste para o método PM-FAO, seguidos de FAO-Radiação, FAO-Blaney-Criddle, Hargreaves e FAO-Tanque, respectivamente. A adoção da metodologia PM-FAO, como padrão, facilita os trabalhos que visam ajustar a estimativa da ET_0 , mostrando-se como uma boa opção prática para esse fim, porém, tem-se necessidade de estudá-la para condições locais.

Estudando a evapotranspiração de referência diária com dados de nove estações meteorológicas, localizadas na bacia do rio Verde Grande, situada no norte do estado de Minas Gerais, Faria et al. (2000) compararam a ET_0 estimada pelas equações ajustadas para os métodos de Hargreaves, Penman e Radiação Solar em relação ao método de Penman-Monteith-FAO. Observaram um ajuste satisfatório, com R^2 superior a 80%, com exceção do método de Hargreaves que obteve, em duas localidades, R^2 inferior a 50%.

Fernandes (2001) utilizando dados coletados em uma estação meteorológica automatizada, instalada em uma área cultivada com soja, verificou que a evapotranspiração real, calculada pelos métodos da razão de Bowen e aerodinâmico simplificado, mostraram correlações altamente significativas entre si e com o método de Penman-Monteith-FAO.

Na comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região Norte Fluminense – RJ, segundo Mendonça et al. (2003), valores de ET_0 obtidos em lisímetro de pesagem com grama com os valores resultantes da utilização dos métodos Penman-Monteith parametrizado pela FAO, Radiação Solar, Makkink, Linacre, Jensen-Haise, Tanque Classe A e Hargreaves, quando se dispõe somente de dados de temperatura máxima e mínima, o método de Hargreaves apresenta adequada precisão para se estimar a ET_0 na região, sobretudo para períodos superiores a sete e dez dias.

Dispondo somente de dados de temperatura máxima e mínima, o método de Hargreaves-Samani (HS) apresentou adequada precisão para se estimar a ET_0 na região Norte Fluminense, sobretudo para períodos superiores a 7 e 10 dias (MENDONÇA et al., 2003). O método de Hargreaves-Samani (HS) pode ser empregado pelos produtores para o manejo da irrigação (NOIA et al., 2014).

Silva et al. (2005) avaliaram a eficiência de métodos de estimativa da ET_0 e concluíram que, na ausência de dados de insolação e velocidade do vento, em Campina Grande – PB, a ET_0 pode ser estimada com razoável precisão pelo método de Hargreaves. Borges e Mediondo (2007) verificaram a precisão dos métodos Blaney-Criddle, Hamon e Hargreaves em comparação ao método PM-FAO, para a bacia do Rio Jacupiranga – SP. Os resultados obtidos indicaram que, na região, o método Hargreaves pode ser aplicado tanto na forma original como na formulação modificada. Devido à alta confiabilidade os autores sugerem o uso do método Hargreaves modificado, para região da bacia do Rio Jacupiranga, visto que este necessita somente de dados de temperatura do ar, conjugando simplicidade e exequibilidade.

O método que mais superestimou a evapotranspiração de referência, independente do intervalo de comparação, foi o de Hargreaves, para localidade de Viçosa – MG, quando comparado ao método padrão PM-FAO (OLIVEIRA et al., 2008). Resultados semelhantes também foram encontrados por Araújo, Costa e Santos (2007), que avaliaram alguns métodos de evapotranspiração para a região de Boa Vista – RR.

Valores da ET_0 estimados por métodos que se baseiam em dados de temperatura e radiação solar para as condições climáticas do Norte da Bahia foram comparados com valores diários da evapotranspiração de referência calculada pelo método PM-FAO (OLIVEIRA et al., 2010). Para essa, região os resultados do estudo mostraram que os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência que utilizaram como variável de entrada a temperatura do ar e a radiação solar global apresentaram desempenho mais eficiente.

Estimar e comparar a evapotranspiração de referência por meio de dois métodos simplificados e avaliar o seu desempenho em relação ao método PM-FAO, e verificar a melhoria dos ajustes para otimização dos métodos simplificados, para oito localidades em regiões produtoras de café arábica, foi o estudo desenvolvido por França Neto et al. (2011). Com base nas pesquisas desenvolvidas, os autores concluíram que o método de Hargreaves apresentou maior aproximação ao método PM-FAO para a estimativa da evapotranspiração de referência. E ainda que, o ajuste local dos métodos simplificados proporcionou melhoria significativa da estimativa da

ET_0 , sendo possível manejar adequadamente a irrigação nas regiões produtoras de café utilizando-se o método de Hargreaves com ajuste dos parâmetros da equação de regressão linear.

O desempenho de métodos de estimativa da ET_0 nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeiras das Missões – RS, foi avaliado por Pilau et al. (2012) através do ajuste de modelos de regressão entre os diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em relação ao método PM-FAO. Nas condições estudadas, os métodos de Makkink e Radiação Solar que incluem dados de radiação solar incidente como variável de entrada pode substituir o método PM-FAO. Dispondo-se apenas de dados de temperatura do ar para o cálculo da ET_0 na escala diária o método de Hargreaves deve ser preferencialmente adotado.

Para doze localidades no Sul de Ontário, Canadá, Sentelhas, Gillespie e Santos (2010), estudando métodos que utilizam, basicamente, dados de temperatura como Hargreaves, Priestley-Taylor e comparando-os ao método padrão PM-FAO, observaram que o método Hargreaves, após alguns ajustes, foi a melhor opção para estimar a ET_0 . Resultados similares foram encontrados por Silva et al. (2008) em Lavras – MG, mostrando a viabilidade do método Hargreaves, quando faltam dados para entrada ao método PM-FAO.

Tagliaferre et al. (2010) afirmam que a escolha do método mais adequado depende da disponibilidade de dados meteorológicos, climatológicos, do nível de precisão exigido, da finalidade, bem como do custo de aquisição de equipamentos.

Adeboye et al. (2009) avaliaram o desempenho dos métodos Jensen-Haise e Hargreaves comparando-os com o método PM-FAO na bacia do Rio Ogun-Osun, na Nigéria. Concluíram, então que o método Jensen-Haise é mais ajustado para estimativa da ET_0 em situações em que apenas as temperaturas máximas e mínimas estão disponíveis. Por sua vez, Maeda, Wiberg e Pellikka (2011) no Sul do Quênia, na África, verificaram que o método de Hargreaves foi o mais apropriado, quando há disponibilidade somente de dados de temperatura do ar.

No estado de Pernambuco na microrregião de Garanhuns, Borges Júnior et al. (2012) avaliaram o desempenho dos métodos FAO-24, Radiação Solar, Priestley-Taylor, Camargo e Hargreaves de estimativa da evapotranspiração de referência em base diária comparando com o método padrão Penman-Monteith-

FAO. Dentre os métodos avaliados o melhor desempenho foi obtido com o método de Priestley-Taylor, com base nos valores do erro médio absoluto. Em relação aos métodos com requerimento apenas de dados de temperatura, o método Hargreaves calibrado foi o que apresentou o melhor desempenho.

Turco, Perecin e Pinto Júnior (2008) avaliaram quatro métodos de estimativa da ET_0 , Makkink, Hargreaves, Tanque Classe A e Radiação Solar comparando-os com o método PM-FAO. Concluíram que o resultado da avaliação dos métodos considerando os erros da evapotranspiração de referência devido à utilização dos instrumentos de medida indica um melhor ajuste para a estimativa da ET_0 para o método de Hargreaves, considerando o método de Penman-Monteith-FAO como padrão para comparação.

Diferentes métodos são desenvolvidos ou recomendados para condições climáticas específicas, dependendo da disponibilidade de dados locais, precisão exigida e escala temporal. Havendo a indisponibilidade de dados de entrada, para o método padrão PM-FAO, justifica-se a utilização de métodos alternativos. Verifica-se na literatura que os métodos mais estudados são: Thornthwaite (TW), Hargreaves (HG), Hargreaves-Samani (HS), Makkink (MK), Camargo (CM), Radiação Solar (RS), Blaney-Criddle (BC), Priestley-Taylor (PT), Turc (TC), Linacre (LN), Hamon (HM), Holdridge (HD), Jensen-Haise (JH), Tanque Classe A (TCA) e, evidentemente o método padrão PM-FAO. Contudo para adequar cada método a uma condição específica, muitos deles passam por ajustes, calibrações, evidenciando-se, portanto, que para adoção de um método, deve-se atentar para as condições climáticas em que ele foi desenvolvido (CARVALHO et al., 2011).

Quando há disponibilidade de dados para a utilização do método PM-FAO esse deve ser utilizado como padrão, tendo em vista sua comprovada precisão, independentemente da escala temporal e espacial. Caso contrário, deve-se avaliar o desempenho de um método que esteja ajustado com o método padrão PM-FAO, os dados disponíveis e adequação às condições climáticas do local.

O indicativo de desvio absoluto médio (MBE) representa o desvio das médias e provê informações sobre o desempenho do método em longo prazo; valores negativos indicam subestimativa, e vice-versa. Quanto menor o valor absoluto de MBE, melhor é o desempenho do modelo testado (STONE, 1993); porém, uma

superestimativa cancela uma subestimativa. Rojas & Sheffield (2013), em estudo no nordeste de Louisiana, EUA, constataram que o método de Hargreaves-Samani superestimou ET_0 em 8%, com valor de MBE de 0,83 mm por dia. Souza (2011), em termos de desvio médio relativo, observou que o método de Jensen-Haise apresentou um melhor desempenho quando comparado com o método FAO56 Penman-Monteith.

2.4 Aquisição automática de dados e integridade dos dados

A evolução tecnológica das estações meteorológicas automáticas a partir dos anos 60 (WMO, 1967) e sua difusão têm proporcionado precisão e rapidez na coleta e ordenação dos dados, facilitando o seu uso nas estimativas da ET_0 , principalmente nos métodos simplificados, com menos dados meteorológicos de entrada requeridos (BAUSCH, 1990). A principal importância da coleta automatizada de dados está no fato de que, assim pode-se obter um monitoramento mais rápido e eficiente das condições atmosféricas para aplicar no manejo dos recursos hídricos durante o período de cultivo, do plantio até a colheita.

As estações meteorológicas automáticas são desenvolvidas para medições mais acuradas e precisas, proporcionando o armazenamento de dados meteorológicos por um longo período de tempo e a um custo relativamente baixo (TANNER, 1990). Utilizando-se dados meteorológicos como entrada, diversos métodos para a estimativa da ET_0 têm sido desenvolvidos com variável complexidade, no entanto, poucos países dispõem, em toda sua extensão territorial, de estações equipadas o suficiente para fornecerem todos os elementos necessários à aplicação de um determinado modelo de estimativa de evapotranspiração (MELLO, 1998, TABARI, 2010).

Comparações na uniformidade dos dados registrados nas estações meteorológicas automáticas em relação às estações convencionais têm demonstrado ajuste eficiente entre os elementos analisados, especialmente precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, considerando os diferentes tipos de sensores, abrigos e frequência de medidas (ALMEIDA; SOUZA; ALCÂNTARA, 2008, CUNHA; MARTINS 2004, OLIVEIRA, 2003, OLIVEIRA et al., 2010,

SCARPARE et al., 2006).

O monitoramento automático de diversas variáveis meteorológicas em tempo real, com maior acuracidade e sensibilidade nas medidas representa um avanço nos sistemas de aquisição automática de dados. Segundo Galvani (2001) a automatização da aquisição de dados meteorológicos tem sido amplamente utilizada pela facilidade, eficiência, qualidade e padronização dos dados coletados, diminuindo os erros oriundos de leitura, interpretação e digitação de dados.

A evolução na eletrônica, na computação e a necessidade de monitoramento do tempo, clima e recursos hídricos promoveram a ampliação das redes observacionais regionais e nacionais (OLIVEIRA, 2003). No entanto, há ainda um número limitado de locais onde estão instaladas estações meteorológicas para medição e monitoramento de elementos do clima como, temperatura e umidade do ar, radiação solar, velocidade do vento e precipitação.

Os sistemas de aquisição automática de dados, além da importância na área de meteorologia, vêm ganhando espaço na área de agronomia, favorecendo o monitoramento das variáveis relacionadas à planta, ao solo e às máquinas agrícolas as quais estão ligadas direta ou indiretamente ao crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas, melhorando o manejo das atividades agrícolas (CUNHA; MARTINS, 2004).

A estação meteorológica automática – EMA é um equipamento que constitui em um sistema de coleta automática de informações ambientais locais (meteorológicas e hidrológicas) e, inclui quatro subsistemas: coleta de dados, controle e armazenamento de dados, energia e comunicação. A coleta de dados é feita através de sensores para medição dos parâmetros meteorológicos a serem observados. As medidas tomadas, em intervalos de minuto a minuto e, integralizadas para o período de uma hora, para serem transmitidas, são: temperatura instantânea, máxima e mínima do ar, umidade relativa instantânea, máxima e mínima do ar, temperatura instantânea, máxima e mínima do ponto de orvalho, pressão atmosférica instantânea, máxima e mínima do ar, velocidade instantânea do vento, direção do vento, radiação solar e precipitação. O controle e armazenamento dos dados são compostos por um processador central (datalogger) de baixo consumo de energia, que faz o registro dos valores observados em uma

unidade de memória que contém as instruções programadas para aquela unidade. Os dados são armazenados em uma memória não volátil que mantém os dados medidos por um período especificado. O subsistema de energia torna a estação independente de energia elétrica externa e não requer nenhum equipamento ou sala para sua operação diária. Inclui baterias e um painel solar responsável pelo fornecimento de energia para o funcionamento de todo o instrumental da EMA. O subsistema de comunicação faz a transmissão dos dados coletados, que estão armazenados na memória (LACERDA, 2012).

As estações automatizadas mais utilizadas no Brasil estão sendo das marcas Campbell Scientific, Inc e Davis Instruments. Elas apresentam tecnologias de ponta, mas a Davis normalmente tem preços mais acessíveis. São utilizadas em universidades e centros educacionais, também no setor agrícola, agências governamentais, em pesquisas e na indústria (TURCO; BARBOSA, 2008).

A confiabilidade de dados meteorológicos obtidos através de sistema automático de aquisição de dados é função da escolha e manutenção dos sensores utilizados na estação meteorológica automática. Segundo Sentelhas et al. (1997) a escolha do sensor é de grande importância, devendo-se seguir a ordem de prioridade: acurácia, custo, manutenção e consumo de energia. A acurácia dos sensores é o que mais limita quanto ao objetivo da coleta e o manejo de recursos hídricos, visto que a baixa precisão pode levar a erros grosseiros na determinação da evapotranspiração de referência (BARROS et al., 2009).

Dados meteorológicos de qualidade duvidosa, obtidos em estações meteorológicas automáticas para a estimativa da ETo, podem conduzir ao manejo inadequado da irrigação. Se os erros da estimativa da ETo forem considerados, a avaliação da eficiência dos métodos para a estimativa da ETo se torna mais consistente e ajustada, otimizando a eficiência da irrigação e manejo da água (TURCO; BARBOSA, 2008).

Avaliações da integridade e qualidade dos dados meteorológicos precisam ser feitas antes dos dados serem utilizados em equações de estimativa da ETo (OLIVEIRA, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental e dados meteorológicos

O trabalho científico foi desenvolvido na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Júlio de Mesquita Filho - Câmpus de Jaboticabal, situada a 21°14'5" de latitude sul, 48°17'9" de longitude oeste e altitude de 613,68 m. O clima de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Cwa.

Os dados meteorológicos foram fornecidos pelo Laboratório de Instrumentação, Automação e Processamento do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP-Câmpus de Jaboticabal. Esses dados foram obtidos em uma estação meteorológica automática da marca Davis Instruments (Figura 1) instalada em área experimental do Departamento de Engenharia Rural (DER).

A estação possui os seguintes sensores: temperatura e umidade relativa do ar, modelo 7859; velocidade do vento, modelo 7911; radiação solar global, modelo 6450; todos da marca Davis Instruments. Os sensores de radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar foram colocados a 1,5 metros acima da superfície gramada e os sensores de velocidade do vento, a 2 metros da superfície gramada, onde foram efetuadas as irrigações para manter o solo em boas condições hídricas.



Figura 1. Estação Meteorológica Automática da marca Davis *Instruments*

Foram utilizados dados médios diários de 1º de janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2014.

3.2 Integridade dos dados

A integridade dos dados da estação meteorológica automática da marca Davis Instruments foi avaliada pelas técnicas descritas por Allen (1996).

Os dados da estação meteorológica automática da marca Davis Instruments foram comparados aos da estação meteorológica automática da marca Campbell Scientific (Estação de Referência), instalada ao seu lado. Segundo Allen (1996) registros produzidos por estações meteorológicas podem ser comparados a registros de estações vizinhas para verificar se houve mudança no funcionamento do equipamento e/ou se problemas de calibração dos instrumentos que ocorrem ao longo do tempo.

A estação automatizada da Campbell Scientific (Figura 2) possui os seguintes sensores: temperatura e umidade relativa do ar, modelo HMP45C Vaisala; velocidade do vento, modelo 03001 RM Young Co; radiação solar global, modelo CM3 Kipp & Zonen; saldo de radiação, modelo NR LITE Kipp & Zonen.



Figura 2. Estação Meteorológica Automática da marca Campbell *Scientific*

Descrição das técnicas de integridade dos dados:

3.2.1 Radiação Solar

A operação do piranômetro e a precisão da calibração podem ser avaliadas pela delineação (plotagem) de hora em hora ou pela média diária das leituras do piranômetro comparando com as radiações de ondas curtas esperadas computadas sob condições de céu limpo (R_{so}). R_{so} pode ser descrita como:

$$R_{so} = K_T R_a \quad (1)$$

na qual,

R_a = radiação extraterrestre;

K_T = índice de “claridade”.

A R_a pode ser computada por períodos diários ou de hora em hora como uma função da latitude, dia do ano e hora do dia. Para dados de 24 horas, o K_T pode variar de 0,7 a 0,8; dependendo da claridade atmosférica (poeira em suspensão no ar, poluição, umidade, etc.), elevação e ângulo solar.

Uma simples previsão para o K_T , onde apenas a elevação do local é considerada, pode ser determinada pela equação:

$$K_T = 0,75 + (2E - 5)z \quad (2)$$

na qual,

z = elevação da estação (m).

A equação (2) foi desenvolvida para uma média do ângulo solar de 45° acima da linha do horizonte.

Estimativas aperfeiçoadas da R_{so} para períodos ou dias com baixos ângulos solares podem ser calculadas utilizando-se a seguinte equação:

$$K_T = \exp \left(\frac{-0,0018P}{K_{tb} \sin \Phi} \right) \quad (3)$$

na qual, K_{tb} = coeficiente de claridade, $0,5 < K_{tb} \leq 1,0$, onde $K_{tb} = 1,0$ para condições de ar limpo e 0,5 para extremamente turbido ou pardo. Geralmente, K_{tb} é tomado como 1,0 para prever o limite mais alto de K_T para a maioria das áreas agrícolas. A variável P significa pressão atmosférica (kPa), e Φ = o ângulo solar acima do horizonte (rad).

Uma porção da absorção ou a dispersão da radiação de luz direta na atmosfera é causada pelo vapor de água (radiação de luz direta é definida como a densidade de fluxo de radiação de onda curta, vinda diretamente do feixe de luz solar, incidente em um plano paralelo da superfície da terra. Radiação difusa é definida como a densidade de fluxo de radiação de onda curta, vinda da dispersão da luz solar). A função K_T pode ser melhorada incluindo a água precipitável como variável. A função K_B prediz o índice de claridade para radiação de luz direta, sob condições de céu limpo com baixa turbidez.

$$K_B = 0,98 \exp [-0,00146P / K_{tb} \sin \Phi - 0,162 (W / \sin \Phi)^{0,25}] \quad (4)$$

na qual,

P = pressão atmosférica (kPa);

W = água precipitável na atmosfera, em cm.

W pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$W = 0,014e_dP + 0,21 \quad (5)$$

na qual,

e_d = pressão de vapor próxima à superfície (kPa).

Um índice de radiação difusa, K_D , pode ser estimado de K_B , usando as seguintes expressões:

$$K_D = 0,35 - 0,33K_B \text{ para } K_B \geq 0,15 \quad (6)$$

$$K_D = 0,18 + 0,82K_B \text{ para } K_B < 0,15$$

Quando as equações (4) e (6) são utilizadas, o índice de claridade é calculado

como a soma de K_B e K_D .

$$K_T = K_B + K_D \quad (7)$$

Para períodos de hora em hora ou mais curtos, o $\sin \Phi$ nas equações (3) e (4) é calculado como:

$$\sin \Phi = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (8)$$

na qual,

φ = latitude da estação (rad);

δ = declinação solar (rad);

ω = ângulo de tempo solar (rad).

Para aplicação das equações (3) e (4) para dados fixados de 24 horas ou mensais, uma média de 24 horas ponderada do $\sin \Phi$ pode ser estimada por ponderação instantânea de $\sin \Phi$, de acordo com a R_a instantânea, durante o curso do dia. O resultado integrado e médio é

$$(\sin \Phi)_{24} = \{ \sin^2 \varphi \sin^2 \delta \omega_s + 2 \sin \varphi \sin \delta \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \cos^2 \varphi \cos^2 \delta \sin \omega_s \} / (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (9)$$

na qual,

ω_s = ângulo do horário do pôr-do-sol.

Uma simplificação da equação (9) determinada por regressão é

$$(\sin \Phi)_{24} = \sin [0,85 + 0,3 \varphi \sin (2\pi / 365 J - 1,39) - 0,42 \varphi^2] \quad (10)$$

na qual,

J = dia do ano (1 a 365);

φ = latitude em graus radianos.

A equação (10) estima $(\sin \Phi)_{24}$ com um padrão de erro de estimativa de aproximadamente 4% para períodos da primavera, verão e outono, sobre uma faixa de -65 a 65° latitude e 6% para todos os meses sobre uma faixa de -60 a 60° latitude. Essa precisão é adequada para prever K_T para períodos de 24h.

3.2.2 Umidade do Ar

Os erros podem ocorrer nos sensores eletrônicos de umidade relativa por histereses, deslinearidade e erros de calibração. Alguns desses erros são herdados nos desenhos dos sensores. Outros resultam da poeira, umidade, insetos, poluição e idade.

É recomendado que os sensores de umidade relativa (UR) e de temperatura do ar, utilizados em estações meteorológicas automatizadas, sejam duplicados. Essa prática, que a princípio pode encarecer o projeto, pode evitar despesas como o reparo de defeitos e as preocupações que dizem respeito à integridade dos dados de UR. É de custo relativamente pequeno, quando comparado ao valor de dados climáticos utilizados no calendário e ao projeto de irrigação em planejamento, nos modelos de recursos hídricos e no estudo do aquecimento global. Quando sensores duplos de UR (e temperatura do ar) produzem sinais similares, então é provável que ambos estejam funcionando apropriadamente, desde que equações de calibração adequadas estejam sendo empregadas. Diferenças significantes entre sensores sinalizam algum tipo de problema com um ou com ambos.

Quando os dados da umidade são medidos em um lugar de referência (em cima da grama aparada e bem regada que está ativamente transpirando), a UR no início da manhã irá se aproximar de 100%, mesmo em áreas semiáridas, se os registros forem tomados dentro de uma região irrigada. Valores de umidade relativa máxima (UR_{max}) abaixo de 80 a 90% indicam problemas na calibração do sensor de UR; de funcionamento; de aridez no local da medida e/ou de divergência das condições de referência.

3.2.3 Velocidade do Vento

É difícil obter precisão nas medições do vento a menos que sejam utilizados instrumentos duplicados. Deve-se sempre sondar registros de ventos para a presença constante de registros de ventos baixos. Para instrumentos eletrônicos, esses registros podem representar um “desvio” numérico na equação de calibração do anemômetro, o qual tem a intenção de representar uma fricção giratória constante e a entrada giratória inicial do instrumento. O registro consistente desses desvios indica tanto a presença de condições excepcionalmente calmas - velocidade do vento menor do que $0,5 \text{ m s}^{-1}$ durante o período inteiro de amostragem (o que é raro) - ou o mau funcionamento do sensor de velocidade do vento devido a um curto circuito elétrico ou fadiga dos procedimentos. Esses problemas podem não ser notados pelo operador da estação.

Quando a checagem em pares dos anemômetros não é possível, pode-se

utilizar um tipo de abordagem de balanço de massa onde o vento cumulativo que corre para o anemômetro é plotado contra o vento cumulativo que corre para uma estação próxima. A inclinação da tendência entre as duas acumulações não deve mudar ao longo do tempo.

3.2.4 Temperatura do Ar e Precipitação Pluviométrica

3.2.4.1 Técnicas de “Análise de Dupla Massa”

Registros produzidos por estações meteorológicas podem ser periodicamente comparados a registros de estações vizinhas para estimar se houve mudança no funcionamento do equipamento e/ou problemas de calibração dos instrumentos. A técnica utilizada para essa proposta é a da análise de massa dupla, em que as somas acumulativas de um parâmetro em duas localidades são plotadas uma contra a outra (por exemplo, vento acumulativo no local 1 versus vento acumulativo no local 2). Uma mudança na inclinação da curva acumulativa em um período de tempo pode indicar uma mudança no funcionamento e na calibração em um dos instrumentos.

Essa técnica é comumente utilizada em hidrologia para avaliar os efeitos: de mudança em locais; as operações dos níveis de precipitação; os níveis do fluxo da correnteza, ou, ainda, para estimar valores que estão faltando.

A proximidade requerida de duas estações para serem comparadas depende da variável meteorológica. Radiação solar e radiação líquida sob vegetação similar deveriam se correlacionar bem sob distâncias de centenas de quilômetros (km) em áreas não montanhosas. Umidade relativa (ou pressão do vapor computada) e temperatura do ar deveriam se correlacionar bem sob distâncias acima de 100 km, desde que estas mudanças na topografia ou clima não sejam abruptas e que a vegetação geral e a aridez das duas localidades sejam similares. As velocidades do vento são as menos prováveis de se correlacionar sob longas distâncias devido a efeitos locais do lugar, os quais podem mudar com a direção do vento devido às diferenças dos climas locais e padrões frontais e aos atrasos de tempo associados. Contudo, em base semanal ou mensal, as correlações podem ser fortes.

3.3 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

Foi obtida a estimativa diária da evapotranspiração de referência (ET_o) pelos seguintes métodos: Makkink (1957), Hargreaves (1976), Hargreaves-Samani (1985), Camargo (PEREIRA et al., 1997), Jensen-Haise (PEREIRA et al., 1997) e Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

Nos métodos estudados em que a radiação solar recomendada a utilizar é a medida, foi estimada a radiação solar incidente na superfície terrestre utilizando as técnicas de Allen et al.(1996).

Descrição dos métodos avaliados:

3.3.1 Método Makkink (M)

$$\text{Seja, } ET_{o_M} = (0,61 Q W) - 0,12$$

a equação básica proposta por Makkink (1957) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, na qual:

ET_{o_M} = evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia⁻¹;

Q = radiação solar segundo Allen et al. (1996), cal cm⁻² dia⁻¹;

W = fator que representa a parte fracional da radiação solar que é utilizada na ET_o, para diferentes valores de temperatura e altitude.

O fator de ponderação (W) foi calculado segundo as fórmulas proposta por Wilson e Rouse (1972) e Viswanadham et al.(1991), citados por Pereira et al. (1997).

$$W = 0,407 + 0,0145T_u, \text{ quando } 0 < T_u < 16^\circ\text{C}$$

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

T_u = temperatura média anual.

3.3.2 Método de Hargreaves (Har)

$$\text{Seja, } ET_{oH} = 0,0075 Q T$$

a equação básica proposta por Hargreaves (1976) para o cálculo da evapotranspiração potencial ou de referência, na qual:

ET_{oH} = evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia⁻¹;

T = temperatura média do ar, °F;

Q = radiação solar segundo Allen et al. (1996), cal cm⁻² dia⁻¹.

3.3.3 Método Hargreaves-Samani (HS)

$$\text{Seja, } ETo_HS = 0,0023Qo (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5}(T + 17,8)$$

na qual,

ET_{oHS} = evapotranspiração de referência, grama, mm d⁻¹;

T_{máx} = temperatura máxima, °C;

T_{mín} = temperatura mínima, °C;

T = temperatura média diária, °C;

Q_o = radiação solar extraterrestre, mm d⁻¹.

3.3.4 Método de Camargo (CM)

$$\text{Seja, } ETo_CM = F \cdot R_a \cdot T_{ar}$$

na qual,

ET_{oCM}: evapotranspiração de referência [mm.dia⁻¹];

F: fator de ajuste que varia com a temperatura média do local (valor utilizado

F = 0,01);

R_a: radiação solar extraterrestre [mm.dia⁻¹].

T_{ar}: temperatura do ar média diária [°C];

3.3.5 Método de Jensen-Haise (JH)

$$\text{Seja, } ETo_JH = (0,0252 \cdot T_{ar} + 0,078) \cdot R_g$$

na qual,

ET_{o_JH}: evapotranspiração de referência [mm.dia⁻¹];

T_{ar}: temperatura do ar média diária [°C];

R_g: radiação solar segundo Allen *et al.* (1996) [mm.dia⁻¹].

3.3.6 Método do Penman-Monteith (PM)

Para cálculo da evapotranspiração de referência Allen *et al.*(1998) propuseram:

$$ET_{o_PM} = \frac{0,409 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) v (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34v)}$$

na qual,

ET_{o_PM} = evapotranspiração de referência, em gramado, mm d⁻¹;

R_n = radiação líquida, MJ m⁻² d⁻¹;

G = fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;

T = temperatura média do ar, °C;

V = velocidade média do vento a 2m de altura, m s⁻¹;

(e_s - e) = déficit de pressão de vapor, kPa;

Δ = curva de pressão de vapor, kPa °C⁻¹;

γ = constante psicrométrica, kPa °C⁻¹;

900 = fator de conversão.

3.4 Avaliação dos dados

A avaliação dos resultados foi realizada para o período diário, utilizando-se análise de regressão e considerando o modelo linear ($y = ax + b$), na qual a variável dependente foi o método de Penman-Monteith (PM) e as estimativas da ETo pelos

demais métodos foi a variável independente.

Para análise dos dados médios diários da ETo, os métodos avaliados foram classificados em relação aos seus respectivos desempenhos a partir do desvio médio absoluto (DMA), desvio médio relativo (DMR), índice de concordância ou índice de Willmott (d), coeficiente de confiança (c), coeficiente de correlação (r) e de determinação (R^2), adotados por Souza (2011). Descrita assim:

$$DMA = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{N}} \quad DMR = \sqrt{\frac{\sum \frac{(P_i - O_i)^2}{O_i}}{N}} \times 100$$

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

$$c = r \times d$$

P: evapotranspiração estimada pelo método em avaliação [mm.dia^{-1}];

O: evapotranspiração estimada pelo método de FAO-56 Penman Monteith [mm.dia^{-1}];

N: número de estimativas.

O coeficiente c, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), é interpretado de acordo com os referidos autores, a saber:

Tabela 1. Valores do coeficiente de confiança e sua classificação.

Valores do coeficiente (c)	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 e 0,65	Mediano
< 0,60	Ruim

O coeficiente de correlação pode variar de -1 a +1. Silva e Barros Filho (2003) sugerem o critério apresentado na tabela abaixo para classificação das correlações.

Tabela 2. Valores do coeficiente de correlação e sua classificação.

Valores do coeficiente (r)	Classificação da correlação
1	Perfeita Positiva
0,70 a 0,99	Muito Forte Positiva
0,30 a 0,69	Moderada Positiva
0,01 a 0,29	Fraca Positiva
0	Nenhuma

O índice de concordância ou ajustamento “d” proposto por Willmott *et al.*

(1985), pode variar entre 0 e 1 para nenhuma concordância e para uma concordância perfeita, respectivamente.

3.5 Técnica de determinação de erros (desvios padrões) desenvolvida por Turco et al. (1994)

Na realização do trabalho foi utilizada a técnica para determinação de erros em métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, desenvolvida por Turco et al. (1994), descrita a seguir: seja uma quantidade ET_o , em que ET_o é uma função conhecida de x variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, isto é, $ET_o = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$.

As variáveis $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, são quantidades medidas com erros $\pm \Delta x_1, \pm \Delta x_2, \pm \Delta x_3, \dots, \pm \Delta x_n$, respectivamente. Esses erros combinados, resultam no erro ΔET_o .

Os erros Δx são combinados de duas maneiras diferentes:

a) Limites Absolutos

Os Δx são obtidos considerando-se os limites absolutos dos mesmos, ou seja, com 100% de confiança.

$$ET_o \pm \Delta ET_o = f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n)$$

Para se obter ΔET_o pode-se desenvolver a expressão em série de Taylor.

$$f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) +$$

$$+ \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} + \frac{1}{2} \left[(\Delta x_1)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} + \dots \right] + \dots$$

Como os Δx são pequenos despreza-se todos os termos onde Δx_i está elevado à uma potência igual a 2 ou mais, ou há produtos $\Delta x_i \Delta x_j$ e pode-se concluir que o erro absoluto fica:

$$Ea = \Delta ETo = \left| \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| + \left| \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| + \dots + \left| \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} \right|$$

O erro relativo porcentual Er , fica, então:

$$Er = \frac{\Delta ETo}{ETo} \cdot 100 = \frac{100 Ea}{ETo}$$

b) Limites Estatísticos

Os Δx são obtidos por processos estatísticos tais como $\pm 2s$ (95% de confiança), $\pm 3s$ (99,7% de confiança). Nesse caso, para calcular o erro utiliza-se a fórmula da raiz da soma dos quadrados (rsq).

$$Ersq = \Delta ETo = \sqrt{\left(\Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 + \dots + \left(\Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2}$$

O erro $Ersq$ tem o mesmo significado estatístico dos erros individuais. Se os Δx são $\pm 2s$, também $Ersq$ será com 95% de confiança.

Quando se pretende obter um erro para a grandeza procurada (evapotranspiração potencial ou de referência) e necessita-se saber o erro com que cada variável x deve ser medida, procede-se da seguinte forma:

Sendo:

$$\Delta ETo = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right|$$

Admite-se por hipótese que:

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| = \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| = \dots = \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right| = \frac{\Delta ETo}{n}$$

Portanto:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i = \frac{\Delta ETo}{n} \quad \text{ou} \quad \Delta x_i = \frac{\Delta ETo}{n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)}$$

Analogamente para erros estatísticos obtém-se:

$$\Delta x_i = \frac{\Delta ETo}{\sqrt{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)}$$

3.6 Avaliação dos dados utilizando metodologias de análise de erros (desvios padrões) da ETo

Para análise dos resultados, considerando os erros da ETo, foram utilizadas as metodologias de Vuolo (1996), descritas a seguir:

a) Transferência do erro da variável independente para a variável dependente.

Quando relacionamos diariamente a EToPM com a ETo (métodos) ocorre que uma grandeza y é medida em função de uma variável x considerada como independente ($y = f(x)$). Entretanto, ambas as grandezas têm erros e, portanto, devem ser associadas incertezas às duas variáveis:

$$x \longrightarrow \sigma_x \quad y \longrightarrow \sigma_{y0}$$

Na análise da dependência entre y e x é desnecessário admitir incertezas nas

duas variáveis. Isto é, geralmente não interessa conhecer os valores verdadeiros de x e y em cada caso, mas interessa conhecer a relação verdadeira entre x e y . Por isso, pode-se admitir que o resultado x é o valor verdadeiro, mas y tem incerteza maior σ_y , dada por:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y0}^2 + \left(\frac{dy}{dx}\right)_o^2 \sigma_x^2, \text{ em que } (dy/dx)_o \text{ é uma estimativa preliminar da}$$

derivada (dy/dx) . A variância σ_y^2 é a variância original σ_{y0}^2 somada a uma

variância $\left(\frac{dy}{dx}\right)_o^2 \sigma_x^2$ que representa a incerteza transferida de x para y .

b) Método dos mínimos quadrados

Quando relacionado diariamente os métodos estudados em relação ao PM apresentam duas variáveis: x e y . Os resultados das medidas são chamados pontos experimentais, pois cada par de valores de x e y pode ser representado como um ponto no gráfico x, y . Um conjunto de pontos experimentais pode ser indicado por $\{x_1, y_1, \sigma_1\}, \{x_2, y_2, \sigma_2\}, \dots, \{x_i, y_i, \sigma_i\}, \dots, \{x_n, y_n, \sigma_n\}$, onde x_i é admitida como variável independente, sendo considerada isenta de erros (item a), enquanto que a incerteza estatística na variável y_i é dada pelo desvio padrão σ_i .

Um problema fundamental é obter a melhor função $f(x)$ para descrever o conjunto de pontos experimentais obtido em medidas das grandezas x e y . O problema de ajustar a melhor função $f(x)$ a um conjunto de pontos experimentais só pode ser resolvido a partir de um critério que defina objetivamente qual é a melhor função. O critério utilizado foi o método dos mínimos quadrados para ajuste da função $f(x)$ ao conjunto de pontos experimentais. Nesse método, a função $f(x)$ deve

ser determinada a partir de uma função geral $f(x; a_1, a_2, \dots, a_n)$ previamente escolhida. Isto é, a função $f(x)$ tem forma e número de parâmetros predeterminados.

Foi utilizada a função $f(x, a_1, a_2) = a_1 + a_2 x$ em que são determinados os valores para a_1 e a_2 . Essa função é de grau 1 (m) e número de parâmetros igual a 2 ($p = m+1$).

A seguir são apresentadas as expressões para ajuste de uma reta para um conjunto de pontos experimentais $\{x_1, y_1, \sigma_1\}, \{x_2, y_2, \sigma_2\}, \dots, \{x_i, y_i, \sigma_i\}, \dots, \{x_n, y_n, \sigma_n\}$, em que σ_i é a incerteza em y_i e as medidas x_i são supostas isentas de erro, conforme método dos mínimos quadrados.

A equação geral da reta é: $y = ax + b$.

O problema consiste em determinar os parâmetros a e b . A reta é um exemplo simples de função linear em relação aos parâmetros:

$f(x, a_1, a_2) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x)$, na qual $f_1(x) = x$, $f_2(x) = 1$, $a_1 = a$ e $a_2 = b$.

Assim, conforme o método dos mínimos quadrados, os melhores valores para a e b são calculados por meio da solução da seguinte equação na forma matricial, para o ajuste de função linear aos parâmetros: $A = M^{-1} B$

na qual

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} y_i f_1 \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} y_i f_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} y_i x_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} y_i \end{bmatrix}$$

$$\text{e} \quad M = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} x_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} x_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} x_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \end{bmatrix}.$$

A matriz M pode ser escrita com notação mais simples:

$$M = \begin{bmatrix} S_{x^2} & S_x \\ S_x & S_\sigma \end{bmatrix}, \quad \text{em que} \quad S_\sigma = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad S_x = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2},$$

$$S_{x^2} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{\sigma_i^2},$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\sigma_i^2}, \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}.$$

A matriz M^{-1} é dada por

$$M^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} S_\sigma & -S_x \\ -S_x & S_{x^2} \end{bmatrix}, \quad \text{em que} \quad \Delta = (S_\sigma S_{x^2} - S_x^2).$$

Assim, os melhores valores para a e b dados por são:

$$a = \frac{1}{\Delta} (S_\sigma S_{xy} - S_x S_y) \quad \text{e} \quad b = \frac{1}{\Delta} (S_{x^2} S_y - S_x S_{xy}).$$

c) Avaliação da qualidade de um ajuste

O critério de avaliação da qualidade do ajuste é essencialmente um método para se determinar se a curva ajustada foi boa em relação aos pontos experimentais,

sendo que o utilizado para avaliação da qualidade de ajuste foi o Teste de X^2 reduzido, descrito a seguir.

Indicando por $f(x)$ a função ajustada a um conjunto de n pontos experimentais (x_i, y_i, σ_i) , a quantidade X^2 (estatístico) é definido como:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_i - f(x_i)]^2}{\sigma_i^2}.$$

A quantidade X^2 (reduzido), é definida como:

$$X_{red}^2 = \frac{X^2}{\nu}, \quad \text{em que } \nu \text{ é o número de graus de liberdade do ajuste.}$$

Como n é o número de pontos e p é o número de parâmetros ajustados, $\nu = (n-p)$.

Após a obtenção dos X_{red}^2 , a avaliação da qualidade de ajuste será feita por meio do gráfico que relaciona ν com X_{red}^2 (Figura 3). Esse gráfico permite obter, para cada ν , um intervalo de confiança $P = 98\%$, para os valores de X_{red}^2 .

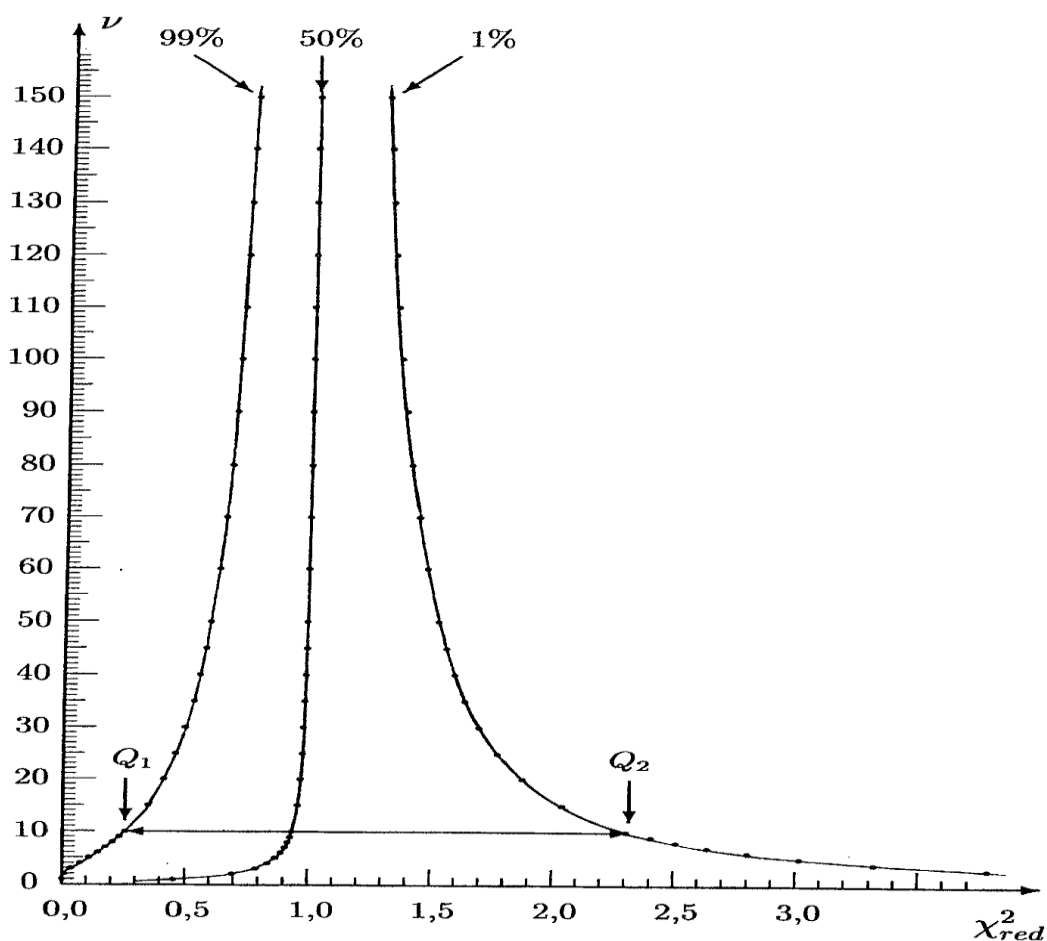


Figura 3. Gráfico que relaciona ν com X_{red}^2 (VUOLO, 1996).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Integridade dos Dados

A avaliação da integridade dos dados da radiação solar global, temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento e precipitação pluviométrica da estação meteorológica da Davis foi considerada aceitável, adotando os procedimentos descritos em Allen (1996).

A radiação solar, medida pela estação meteorológica da Davis é de boa qualidade, por apresentar valores menores que a radiação solar estimada, pelas equações de Allen (1996), corroborando com os resultados obtidos por Turco e Barbosa (2008) e Oliveira (2014) (figura 4).

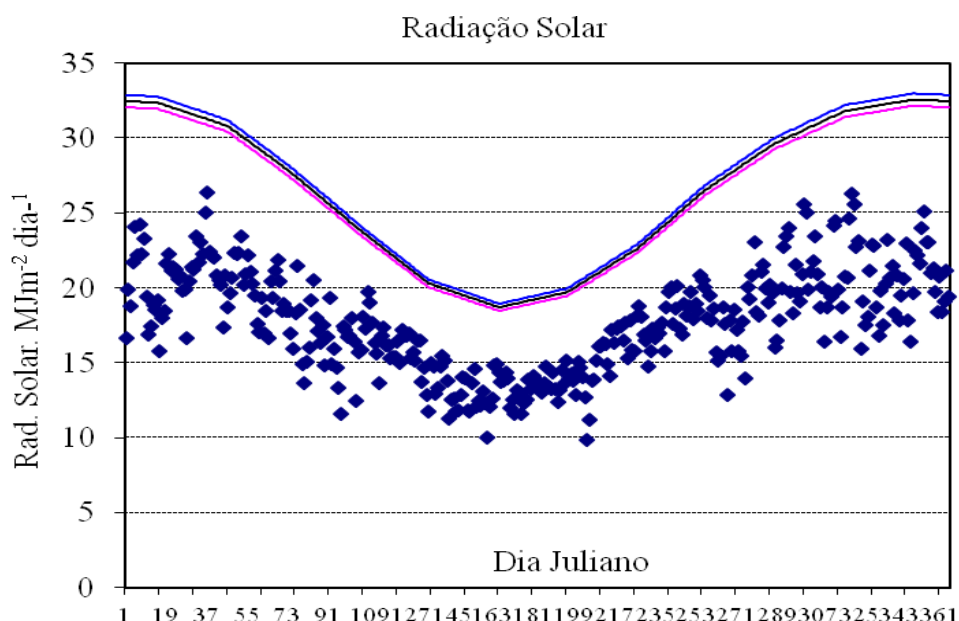


Figura 4. Radiação solar medida pela estação meteorológica automática da DAVIS e Radiação Solar estimada por três equações das técnicas descritas por Allen (1996).

Os registros de velocidade do vento das estações meteorológicas, foram comparados na forma acumulativa (acumulando a velocidade do vento diariamente) segundo a técnica da análise de dupla massa (figura 5). A diferença dos valores obtidos na forma acumulativa dos anemômetros é devido ao *offset* (sensibilidade mínima do sensor para registro) utilizado na programação das estações. A de referência utiliza um *offset* de $0,2 \text{ m s}^{-1}$ e o da estação Davis de $0,0 \text{ m s}^{-1}$. Turco e Barbosa (2008) obtiveram o mesmo resultado quando analisaram os dados da Davis em relação aos dados da estação meteorológica da Campbell (referência).

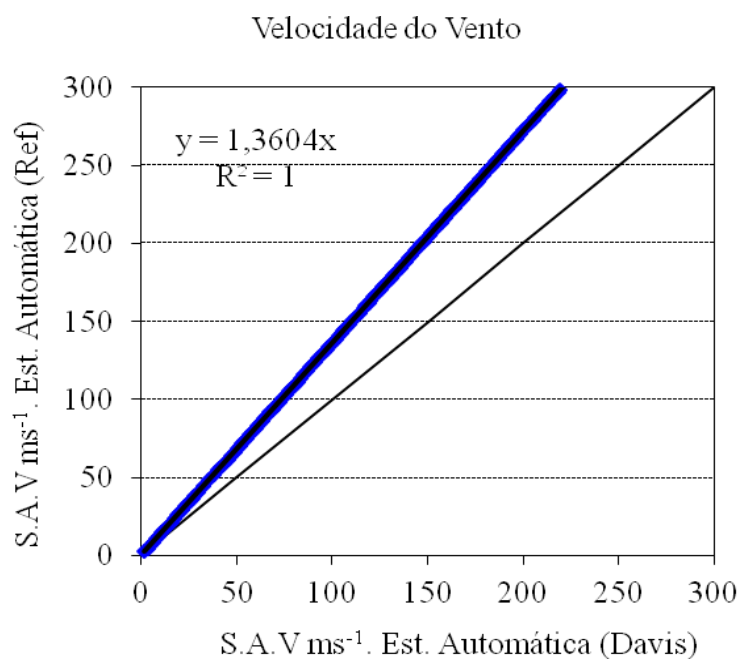


Figura 5. Soma acumulativa da Velocidade do Vento das estações meteorológicas de Referência e da Davis.

Valores de umidade relativa da estação da Davis acompanharam a de referência (figura 6) indicando adequada calibração do sensor de UR; bom funcionamento; boas condições do manejo do local da estação, segundo pesquisas de Turco e Barbosa (2008) e Oliveira (2014).

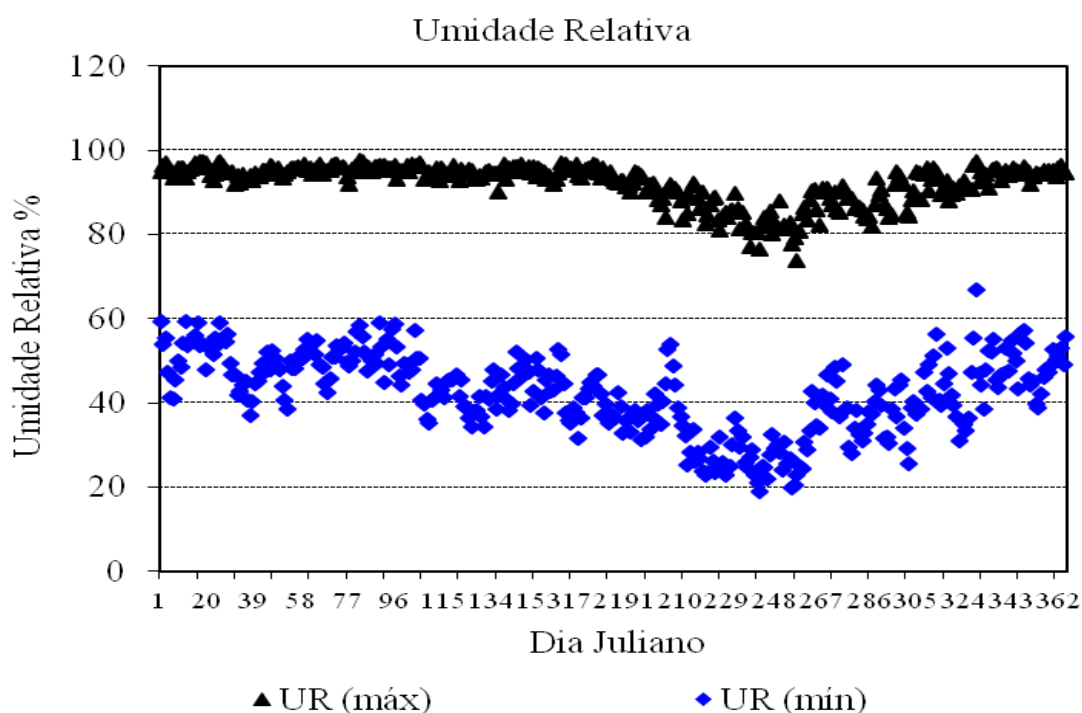


Figura 6. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica da Davis.

Para as temperaturas mínima e máxima a inclinação da reta apresentada nos gráficos (figuras 7 e 8) de praticamente 1/1 (um para um) indica uma boa qualidade dos dados, segundo Oliveira (2014).

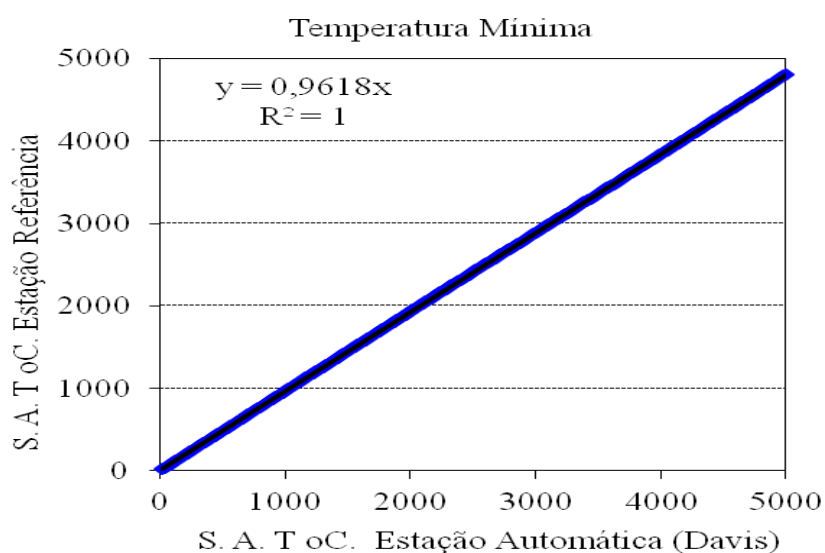


Figura 7. Soma acumulada da Temperatura Mínima das estações meteorológicas de referência e da Davis.

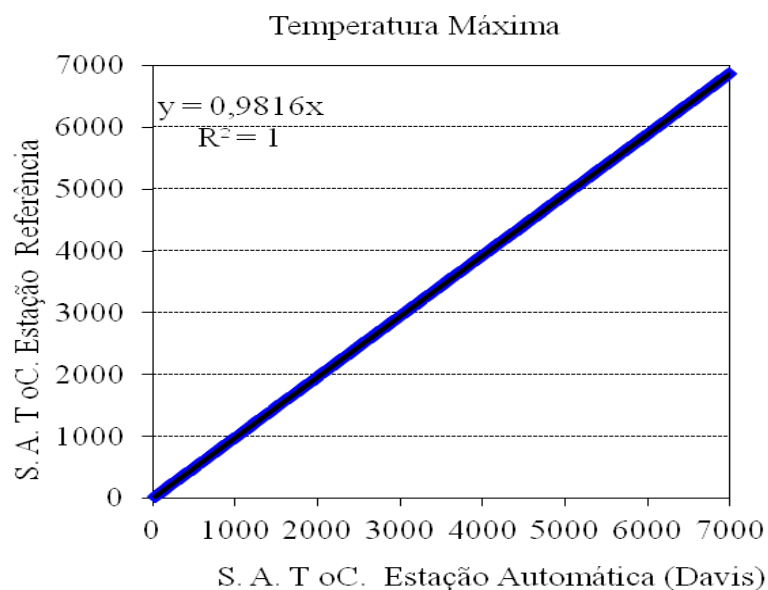


Figura 8. Soma acumulativa da Temperatura Máxima das estações meteorológicas de referência e da Davis.

4.2 Avaliação dos dados dos médios da ETo

A análise de regressão linear entre os métodos avaliados e o método padrão, com suas respectivas equações de ajuste e coeficiente de determinação (R^2) pode ser observada nas figuras 9, 10, 11, 12 e 13. Aos gráficos foi adicionada uma linha ao meio, a fim de auxiliar a verificação de quando um método sub ou superestima o método padrão. Com isso percebe-se que Jensen-Haise superestima o método padrão, enquanto os outros métodos o subestimam.

A equação de Jensen-Haise (1997) segundo Medeiros (2008), foi uma equação desenvolvida para regiões áridas e semi-áridas, o que explica sua razoável adaptabilidade para o local de estudo (figura 13).

O método Hargreaves-Samani (figura 10) subestimou a ETo e sendo oposto ao encontrado por Carvalho et al. (2015) para região Sudeste do Brasil, provavelmente pelo fato de o modelo ter sido desenvolvido em condições de clima árido (HARGREAVES; SAMANI, 1985), mas sendo o mais adequado às condições da região estudada por apresentar coeficiente de determinação (0,86). Os resultados de subestimação de HS, coincidem com os de Souza et al. (2011), em condição de céu parcialmente coberto, quando estudaram métodos em diferentes

nebulosidade.

Vescove e Turco (2005) estudaram três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e obtiveram resultado similar ao avaliar o método de Makkink (1957) nas condições climáticas de Araraquara-SP – a menos de 60 km de Jaboticabal - pois o método subestimou a evapotranspiração de Penman-Monteith (figura 11).

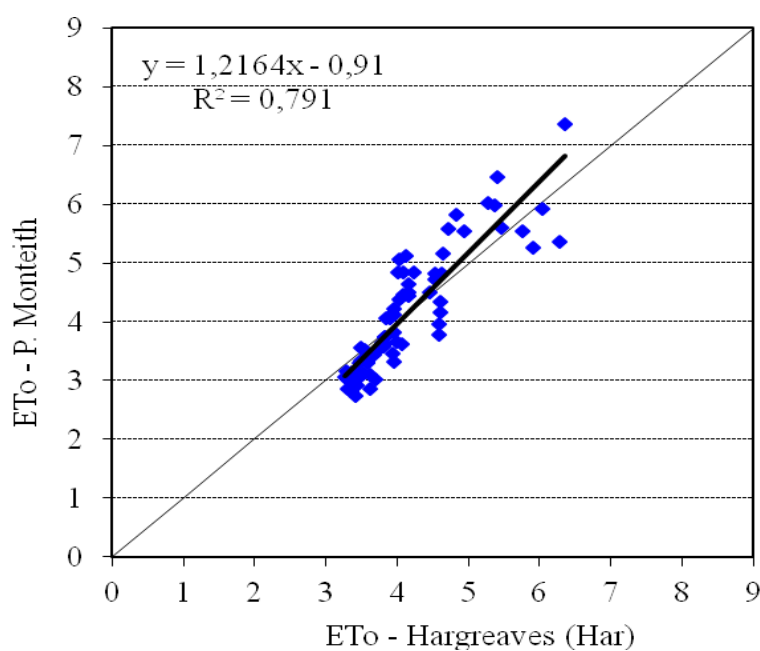


Figura 9. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Hargreaves, em relação ao Penman-Monteith.

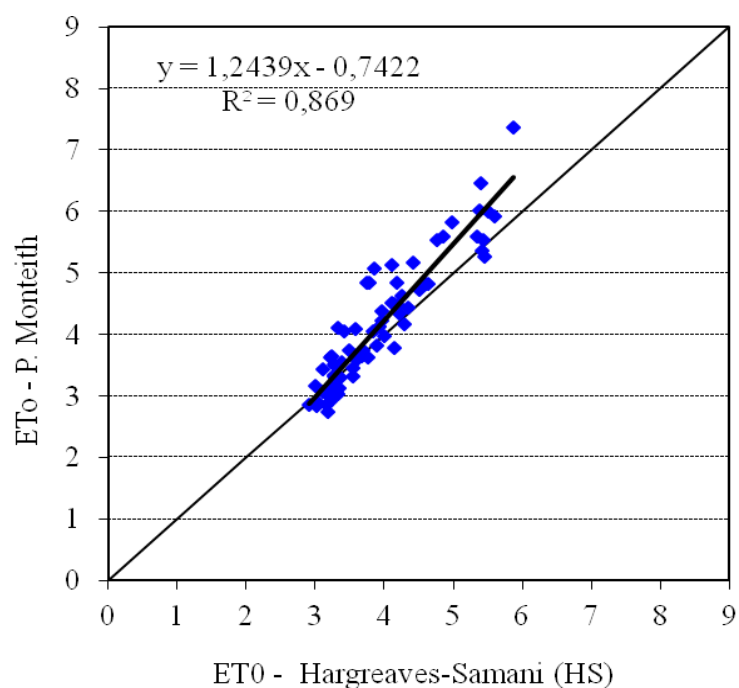


Figura 10. Correlação entre a os valores diários da ET_0 , obtidos com o método de Hargreaves-Samani, em relação ao Penman-Monteith.

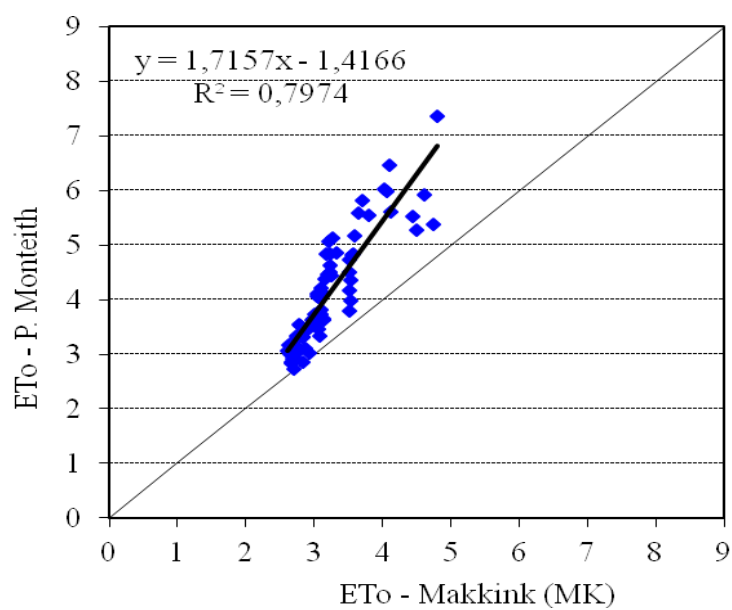


Figura 11. Correlação entre a os valores diários da ET_0 , obtidos com o método de Makkink, em relação ao Penman-Monteith.

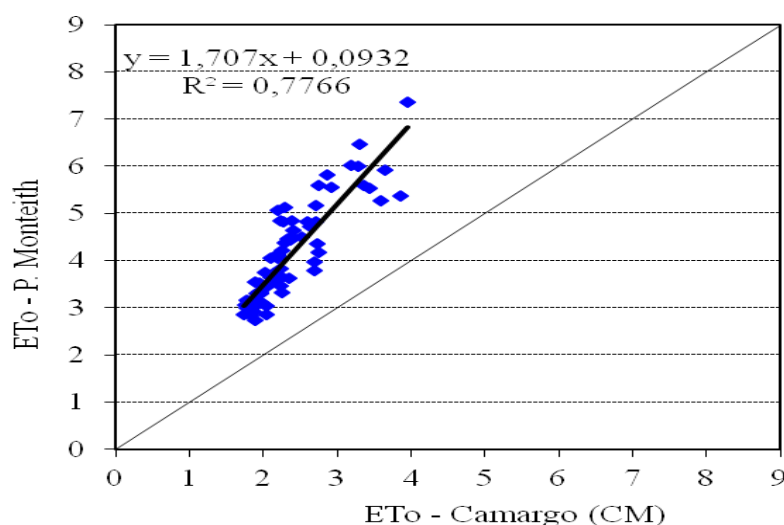


Figura 12. Correlação entre a os valores diários da ETo , obtidos com o método de Camargo, em relação ao Penman-Monteith.

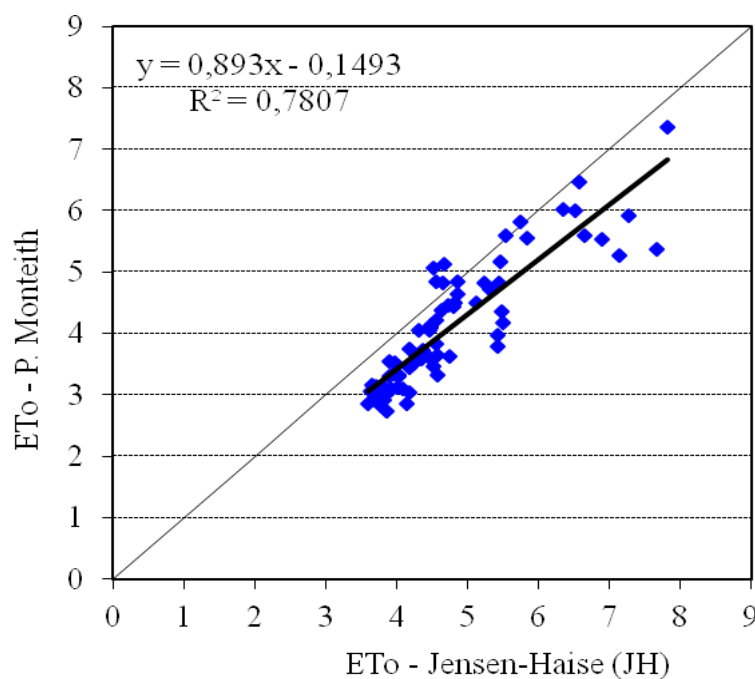


Figura 13. Correlação entre a os valores diários da ETo , obtidos com o método de Jensen-Haise, em relação ao Penman-Monteith.

O índice de concordância d de Willmott, que varia de 0 a 1, representa o quanto os valores estimados se ajustam a valores medidos, ou seja, é uma medida de quão bem o modelo estima o afastamento dos dados da média observada (WILLMOTT, 1985). Com isso, percebe-se que os métodos de

Hargreaves-Samani (0,95) e Hargreaves (0,91), mais se aproximam de uma concordância perfeita. Em contra partida, Camargo (0,41) é o mais próximo de nenhuma concordância. Esses valores divergem dos valores observados por Chagas et al. (2013) os quais foram todos superiores a 0,82.

Os coeficientes de correlação apresentaram uma correlação muito forte, positivamente, nos métodos analisados sendo acima de 0,88 com o método Penman-Monteith FAO56. Dessa forma, os métodos de Makkink e Jensen-Haise coincidem em correlação com o observado por Souza (2011). O coeficiente de correlação encontrado para Hargreaves-Samani (0,93) foi superior aos observados por Noia et al. (2014) em períodos diferentes, diário 0,77, decedial 0,80 e mensal 0,84 para Dourados-MS.

Tabela 3. Valores do coeficiente de correlação (r), de concordância (d) e de confiança (índice c), com radiação solar estimada.

Método	d	r	Índice C	Classificação
Hargreaves (Har)	0,91	0,88	0,816	Muito Bom
Hargreaves-Samani (HS)	0,95	0,93	0,889	Ótimo
Makkink (MK)	0,68	0,89	0,610	Mediano
Camargo (CM)	0,41	0,88	0,365	Ruim
Jensen-Haise (JH)	0,84	0,88	0,750	Bom

4.3 Avaliação dos desvios padrões da ETo

A Figura 14,15,16, 17 e 18 apresentam as retas $y = ax + b$ ajustadas aos pontos experimentais, obtidos diariamente pelos métodos estudados, em relação ao método de Penman-Monteith e respectivas incertezas.

No ajuste das retas da Figura 14, 15, 16, 17 e 18, $\chi^2_{red} = 1,2; 0,8; 1,1; 1,3$ e $1,22$ ($\nu = 73$), para os métodos de Hargreaves, Hargreaves-Samani, Makkink, Camargo e Jensen-Haise, respectivamente. Como pode ser visto na figura 3, esses valores de qui-quadrado reduzido (χ^2_{red}) está bem dentro da faixa de valores aceitáveis e o ajuste pode ser considerado bom. Estatisticamente há evidências, com 98% de confiança, que os métodos de Penman-Monteith e os métodos estudados não são distintos, portanto, podem ser comparados com o de Penman-Monteith.

No método de Hargreaves o valor de $\chi^2_{red} = 1,2$ ($\nu = 73$) é acima dos encontrados por Lacerda (2012) para esse método na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba que foram de $\chi^2_{red} = 0,872$ ($\nu = 244$) para o município de Patrocínio até $\chi^2_{red} = 0,939$ ($\nu = 243$) para o município de Ituiutaba, também são valores dentro da faixa aceitável e ajustes considerados bons.

No ajuste da reta, o valor de $\chi^2_{red} = 1,1$ ($\nu = 73$) obtido pelo método de Makkink é muito próximo do encontrado por Lacerda (2012) de $\chi^2_{red} = 1,111$ ($\nu = 245$) para o município de Araxá, também podendo ser comparados devido a faixa aceitável e ajustes considerados bons.

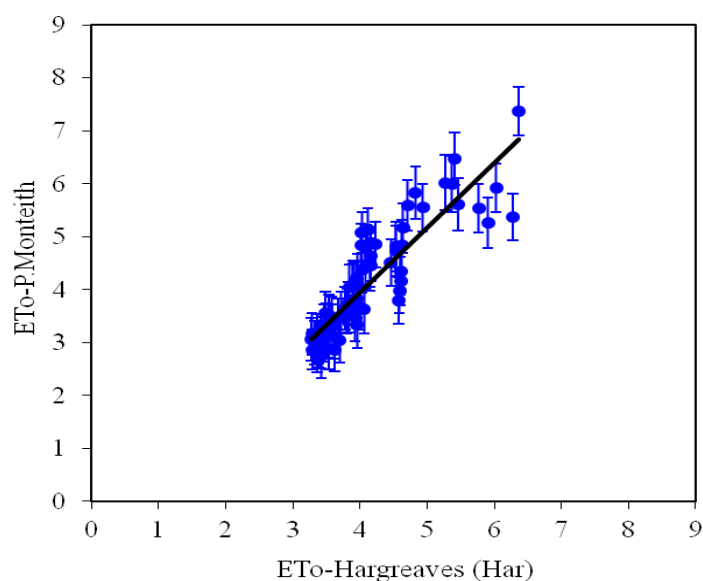


Figura 14. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Hargreaves, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

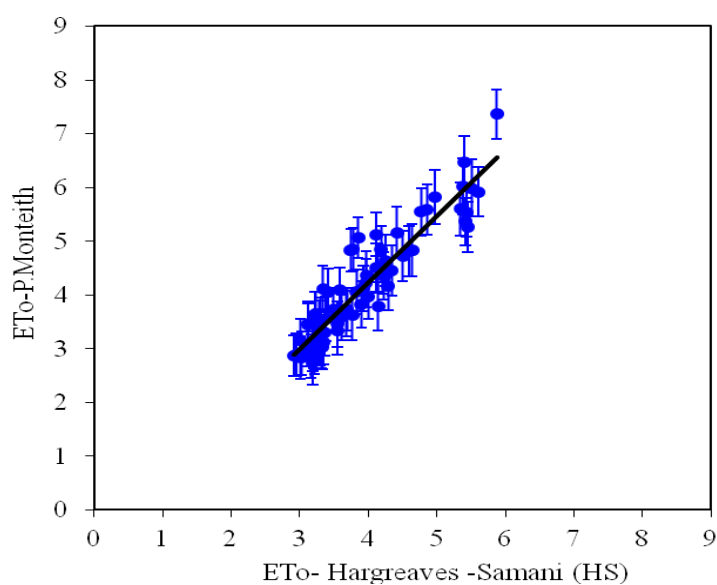


Figura 15. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Hargreaves-Samani, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

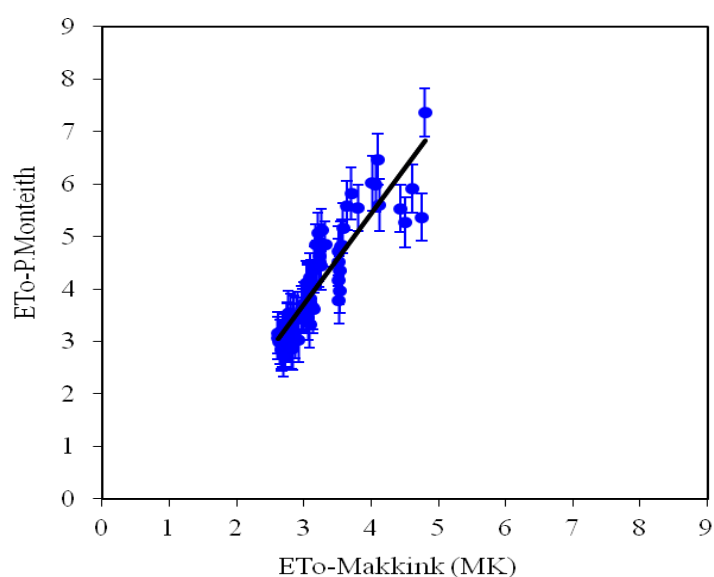


Figura 16. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Makkink, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

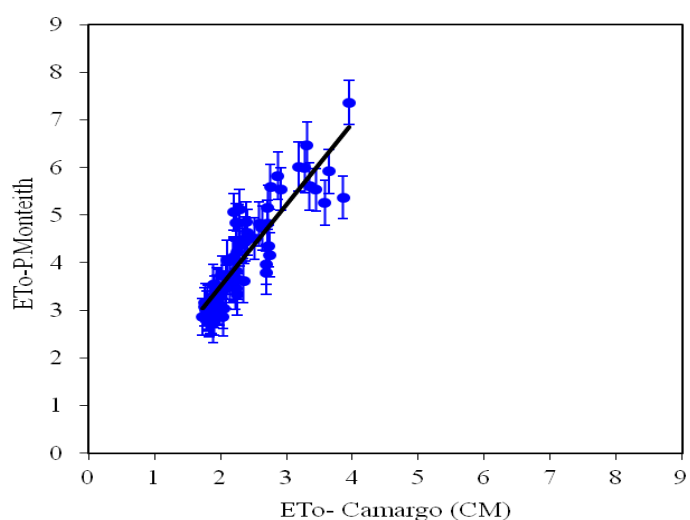


Figura 17. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Camargo, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

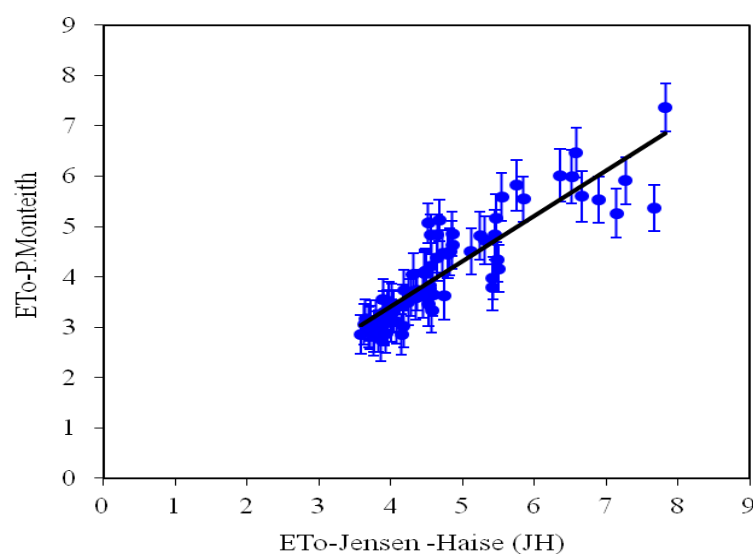


Figura 18. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Jensen-Haise, em relação ao método de Penman-Monteith) e respectivas incertezas.

5 CONCLUSÕES

A integridade dos dados da estação meteorológica da Davis foi aceitável.

O método Hargreaves-Samani apresentou maior eficiência na estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Jaboticabal.

O método de Camargo comprovou baixa adaptabilidade para região de Jaboticabal.

6 REFERÊNCIAS

ADEBOYE, O. B.; OSUNBITAN, J. A.; ADEKALU, K. O.; OKUNDE, D. A. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and temperature based models in estimating reference evapotranspiration using complete and limited data, application to Nigeria. **Agricultural Engineering International**, Beijing, v. 11, n. 1, p. 1-25, 2009.

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v.19, n. 5, p. 437-449, 2011.

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

ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 2, p. 97-106, 1996.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estudio Riego e Drenaje, Paper 56).

ALMEIDA, H. A.; SOUZA, J. A.; ALCÂNTARA, H. M. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 16, n. 1, p. 58-66, 2008.

ARAÚJO, W. F.; COSTA, A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativas da evapotranspiração de referência (ET_0) para Boa Vista – RR. **Revista**

Caatinga, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.

BACK, A. J. Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 139-145, 2007.

BARROS, V. R.; SOUZA, A.P.; FONSECA, D.C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

BAUSCH, W. C. **Sensor height effects on calculated reference evapotranspiration**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 33, p. 791-798, 1990.

BONOMO, R. **Análise da Irrigação na cafeicultura em áreas de cerrado de Minas Gerais**. 1999. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, 1999.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANJOS, R. J.; SILVA, T. J. A.; LIMA, J. R. S.; ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 380-390, 2012.

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**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.

CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, n. 12, p. 163-213, 1962.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

CAMARGO, A. P.; 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.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CARVALHO, D. F. de; ROCHA, H. S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. de Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.1, p.1-11, 2015.

CHAGAS, R. M.; FACCIOLI, G. G.; NETTO, A. de O.; SOUSA, I. F. de; VASCO, A. N. do; SILVA, M. G. da; Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (eto) no município de Rio Real-BA. **Irriga**, v. 18, n.1, p. 351-363, 2013.

CHAUHAN, S.; SHRIVASTAVA, R. K. Performance evaluation of reference evapotranspiration estimation using climate based methods and artificial neural networks. **Water Resource Management**, New York, v. 23, n. 5, p. 825-837, 2009.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de Bristow-Campbell. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 619-626, 2010.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 303-307, 2005.

CUENCA, R. H.; NICHOLSON, M. T. Application of Penman equation wind function. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE, New York, v. 108, n. 1, p. 13-23, 1982.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Estudo comparativo entre elementos meteorológicos obtidos em estações meteorológicas convencional e automática em Botucatu, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 103-111,

2004.

DANTAS NETO, F. S. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Mossoró – RN. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 7, n. 1, p. 46-55, 1999.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage, Paper 24).

FARIA, F. J.; CARVALHO, D. F.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, M. A. A. Influência do método de estimativa na demanda de irrigação suplementar para o milho (*Zea mays* L.), na bacia do rio Verde Grande –MG. **Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, p. 187-196, 2000.

FERNANDES, E. J. **Determinação da evapotranspiração real pelos métodos da razão de Bowen e aerodinâmico simplificado**. 2001. 125 f. Tese de Livre Docência – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

FERNANDES, D. S., HEINEMANN, A. B., PAZ, R. L. F., AMORIM, A. O. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.2, p.246-255, 2012.

FRANÇA NETO, A.C.; MANTOVANI, E. C.; VICENTE, M. R.; VIEIRA, G. H. S.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G. Comparação entre métodos simplificados de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) para regiões produtoras de café brasileiras. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 159-171, 2011.

GALVANI, E. **Avaliação agrometeorológica do cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) em ambientes protegidos e a campo, em ciclos de outono-inverno e primavera-verão**. Botucatu: UNESP, 2001. 124 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas – Universidade Estadual Paulista, 2001.

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J.; ALLEN, R.G. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: impact on Penman-Monteith reference ET estimates in

semiarid regions. **Agriculture Water Management**, Amsterdam, v. 89, n. 3, p. 275-286, 2007.

HARGREAVES, G.H.; **Climate and irrigation requirements for Brazil**. Logan, Utah State University, 1976. 44 p.

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

JABLOUN, M. SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 6, p. 707-715, 2008.

JENSEN, M. E. **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. ASCE, New York, 1973. p. 100-115.

KHOOB, A. R. Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 3, p. 253-259, 2008.

LACERDA, Z.C. de **métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a mesoregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba-MG**. 2012. 71f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2012

MACHADO, R. E.; MATTOS, A. Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 193-197, 2000.

MAEDA, E.E.; WIBERG, D.A.; PELLIKKA, P.K.E. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. **Applied Geography**, Amsterdam, v. 31, n. 1, p. 251-258, 2011.

MAKKINK, G.H. Ekzameno de la formula de Penman. **Netherlands Journal Agricultural Science**, Wageningen, v. 5, p. 290-305, 1957.

MCMAHON, T.A.; PEEL, M.C.; LOWE, L.; SRIKANTHAN, R.; MCVICAR, T.R.; Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis, **Hydrol. Earth Sys. Sci.**, 17, 1331-1363, 2013.

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

MELLO, J. P. **Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Penman-Monteith-FAO**. 1998. 79 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 1998.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MOHAWESH, O. E. Spatio-temporal calibration of Blaney-Criddle Equation in Arid and Semiarid environment. **Water Resources Management**, Amsterdam, v. 24, p. 2187-2201, 2010.

NOIA, C. P. Z.; PEREIRA, S. B.; ROSA, D. R. Q.; ALMEIDA, R. A.; Evapotranspiração de referência estimada pelos métodos Penman–Monteith-FAO (56) e Hargreaves & Samani para o município de Dourados, MS. **Rev Agrarian**. v.7, n.24, p.300-308, 2014.

OLIVEIRA, A. D. **Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência utilizando dados de estação meteorológica convencional e automática**. 2003. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) Universidade Estadual Paulista – UNESP, Jaboticabal, 2003.

OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; CAVALCANTI JÚNIOR, E. G.; SOBRINHO, J. E.; VIEIRA, R. Y. M. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Jaboticabal – SP. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 4, p. 108-114, 2010.

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; SANTOS, F. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando lisímetro e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 1, p. 58-67, 2008.

OLIVEIRA, P. J. D. de. **Integridade dos dados meteorológicos obtidos por duas estações meteorológicas automatizadas**. 2014. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

ORTEGA-FARIAS, S.; IRMAK, S.; CUENGA, R.H. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling. **Irrigation Science**, Sidney, v. 28, n.1, p. 1-13, 2009.

PEREIRA, A. R.; MANIERO, M. A.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. p. 17-47.

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.

ROJAS, J.P.; SHEFFIELD, R.E. Evaluation of daily reference evapotranspiration methods as compared with the ASCE-EWRI Penman-Monteith equation using limited weather data in northeast Louisiana. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, p.285-292, 2013.

SCARPARE, F. V.; OLIVEIRA, G. X. S.; SIMON, J.; PIEDADE, S. M. S.; ANGELOCCI, L. R. Comparação da uniformidade de dados meteorológicos de

estação meteorológica convencional e automática – Piracicaba/SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14. 2006. Florianópolis – SC, **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. i-xii, 1996.

SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**: necessidades de água para as plantas cultivadas. Brasília, DF: ABEAS, 1998, 181 p. (Curso de especialização por tutoria à distância).

SENTELHAS, P. C.; MORAIS, S. O.; PIEDADE, S. M. S.; PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 215-221, 1997.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontário, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SILVA, D.; BARROS FILHO, J. **Estatística**. São Paulo, USP. (Apostila). 2003.

SILVA, V. P. R.; BELO, A. F.; SILVA, B. B.; CAMPOS, J. H. B. C. desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 547-553, 2005.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, K. M. G.; CARVALHO, L. G.; EVANGELHISTA, A. W. P. Estimate of reference evapotranspiration by FAO Penman-Monteith equation only having maximum and minimum temperatures in Lavras, Minas Gerais State, Brazil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 37, Foz do Iguaçu. 2008. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2008. 1 CD-ROM.

STONE, R.J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v.51, p.289-291, 1993.

SOUZA, A.P. de; CARVALHO, D.F. de; SILVA, L.B. da; ALMEIDA, F.T. de; ROCHA, H.S. da. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.219-228, 2011.

SOUZA, A. da S. P. de. **Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo de irrigação**. 2011. 70 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R.; ROCHA, F.; SANTOS, L. Estudo Comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis- BA. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TABARI, H. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. **Water Resource Management**, Amsterdam, v. 24, n. 10, p. 2311-2337, 2010.

TANNER, C. B.; JURY, W. A. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. **Agronomy Journal**, v. 68, p. 239-242, 1976.

TANNER, B. D. Automated weather stations. **Remote Sensing Reviews**, Harwood, v. 5, n. 1, p. 73-98, 1990.

TURCO, J. E. P.; PINOTTI, J. R.; PAVANI, L. C.; FERNANDES, E. J. Técnica para determinação de erros em métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Engenharia Agrícola**, Joboticabal, v. 14, p. 31-37, 1994.

TURCO, J.E.P., BARBOSA, J.C. Avaliação de duas estações meteorológicas automatizadas, para estimativa diária da evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith. **Irriga: Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, v.13, n.3, p.339-354. 2008.

TURCO, J. E. P.; PERECIN, D.; PINTO JÚNIOR, D. L. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 63-80, 2008.

TURCO, J. E. P.; FARIA, M. T.; FERNANDES, E. J. Influência da forma de obtenção do saldo de radiação na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 3, p. 215-228, 2005.

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**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 713-721, 2005.

VUOLO, J. E. **Fundamentos da teoria de erros**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1996. p. 160-163, 176, 192-197.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1985.

WMO. **Automatic weather stations**. Geneva: World Meteorological Organization. 1967. 364 p. (Technical Note n. 82).

ANEXOS

ANEXO 1. Radiação solar recebida no limite mais externo da atmosfera no 15º dia de cada mês entre latitudes 10ºN Equador e 40ºS. (valores de Q_0 em $\text{cal/cm}^2\text{dia}$).

Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
10ºN	761	814	873	885	873	867	873	879	867	826	767	732
8ºN	779	832	879	879	861	856	861	873	873	838	785	749
6ºN	797	844	879	873	850	838	850	861	873	850	802	873
2ºN	832	867	885	861	826	802	814	844	873	867	838	814
Equador	850	879	885	856	808	785	797	832	867	873	856	832
2ºS	861	885	885	850	791	767	779	820	867	879	873	850
4ºS	879	897	885	838	779	749	755	808	861	885	885	873
6ºS	897	903	885	826	755	732	743	797	861	897	897	890
8ºS	909	909	879	814	738	708	720	779	856	897	909	903
10ºS	920	920	873	802	720	684	702	767	850	897	915	920
12ºS	938	920	867	791	696	661	684	755	838	897	926	932
14ºS	950	926	861	773	679	637	661	738	838	903	938	944
16ºS	956	932	856	755	661	614	637	720	826	903	944	956
18ºS	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
20ºS	979	932	838	720	614	566	596	684	802	897	962	985
22ºS	991	932	826	702	590	543	572	661	791	897	968	991
24ºS	991	932	814	684	566	519	549	643	779	897	968	1003
26ºS	997	926	802	661	543	496	519	625	761	891	974	1015
28ºS	1003	920	791	643	519	460	496	602	743	885	979	1021
30ºS	1003	920	779	620	496	437	472	578	732	873	979	1027
32ºS	1009	909	767	596	472	407	448	555	714	867	979	1033
34ºS	1009	903	743	578	448	378	313	531	696	861	979	1038
36ºS	1009	897	732	555	419	354	389	507	673	850	979	1038
38ºS	1009	885	714	531	389	330	366	484	649	838	974	1044
40ºS	1003	879	690	507	360	295	336	460	631	826	968	1044

Dados interpolados de Shaw, Napier – Manual of Meteorology, Cambridge, University Press