

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

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELA
EQUAÇÃO DE HARGREAVES EM CLIMA SUBTROPICAL**

Layla Gerusa Souza lima

Engenheira Agrônoma

2017

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

Layla Gerusa Souza lima

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.**

2017

L732e Lima, Layla Gerusa Souza
Estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de
hargreaves em clima subtropical / Layla Gerusa Souza Lima. --
Jaboticabal, 2017
vi, 53 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017

Orientador: José Eduardo Pitelli Turco

Banca examinadora: David Luciano Rosalen, Anaira Denise
Caramelo.

Bibliografia

1. Hargreaves 2. Penman Monteith. 3. Evapotranspiração de
Referência. 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

TÍTULO: ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELA EQUAÇÃO DE HARGREAVES EM CLIMA SUBTROPICAL

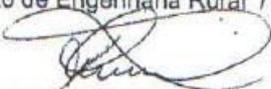
AUTORA: LAYLA GERUSA SOUZA LIMA

ORIENTADOR: JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. DAVID LUCIANO ROSALEN
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Profa. Dra. ANAÍRA DENISE CAMELO
UNIARA / Araraquara, SP

Jaboticabal, 07 de março de 2017.

SUMÁRIO

Página

RESUMO	v
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	16
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
3 MATERIAL E MÉTODOS	4
3.1 Área experimental e dados metereológicos.....	4
3.2 Integridade dos dados, técnicas descritas por Allen.....	5
3.2.1 Radiação Solar.....	6
3.2.2 Umidade do Ar	9
3.2.3 Velocidade do Vento.....	9
3.2.4 Temperatura do Ar e Precipitação Pluviométrica	10
3.2.4.1 Técnica de “Análise de Dupla Massa”	10
3.3 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.....	11
3.3.1 Método de Hargreaves.....	11
3.3.2 Avaliação dos dados médios	11
3.3.3 Técnica de determinação de erros (desvios padrões) desenvolvida por Turco et al. (1994).....	12
3.6 Avaliação dos dados utilizando metodologias de análise de erros (desvios padrões) da Evapotranspiração de Referência.....	15
3.7 Calibração local da equação de Hargreaves.....	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1 Integridade dos Dados.....	20
4.2 Avaliação dos dados dos médios da ETo.....	24
4.3 Avaliação dos desvios padrões da ETo.....	29
4.4 Equação de Hargreaves calibrada.....	34
5 CONCLUSÕES.....	35
6 REFERÊNCIAS	36

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELA EQUAÇÃO DE HARGREAVES EM CLIMA DO TIPO SUBTROPICAL

RESUMO - Uma forma de verificar a eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) e realizar comparativo com a equação de Penman-Monteith FAO-56, recomendado pela FAO. Objetivou-se com o desenvolvimento avaliar a equação de Hargreaves, comparando-a com a equação de Penman-Monteith FAO-56, a fim de verificar a possibilidade de estimar-se a evapotranspiração de referência para as condições climáticas do município de Jaboticabal, em SP, bem como fazer a calibração local desta equação. Para esse fim, foram utilizados dados do período de 01/01/2009 a 31/12/2015 de uma estação meteorológica automatizada instalada na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal, SP. Por intermédio da estação meteorológica, foram obtidas medidas da radiação solar global, radiação líquida, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento. A análise dos resultados foi realizada aplicando-se técnicas que verificam a integridade dos dados meteorológicos e utilizando metodologias de análise dos dados médios e desvios padrões da ET_0 . Foi realizada a calibração local da equação de Hargreaves por meio do ajuste do parâmetro empírico HE (expoente empírico de Hargreaves) da equação. A integridade dos dados da estação meteorológica foi aceitável. O resultado de avaliação do método, utilizando a metodologia de análise de desvios padrões diários da ET_0 , considerando-se a equação de Penman-Monteith FAO-56 como padrão, indica que foi estabelecida uma relação linear, portanto, podem ser comparados. Conclui-se que equação de Hargreaves é uma opção para estimar os valores de ET_0 em clima do tipo subtropical, em locais em que a disponibilidade de dados climáticos é limitada.

PALAVRAS-CHAVE: Hargreaves, Penman-Monteith FAO-56, evapotranspiração de referência.

ESTIMATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION BY THE HARGREAVES EQUATION IN SUBTROPICAL CLIMATE

ABSTRACT – One way to verify the efficiency of estimation methods of reference evapotranspiration (ET_0) is to compare with FAO-56 Penman-Monteith equation, recommended by FAO to estimate the reference evapotranspiration (ET_0). The objective of this work was to evaluate the Hargreaves equation, comparing it to the FAO-56 Penman-Monteith equation, aiming verify the possibility of estimating the reference evapotranspiration for the climatic conditions of Jaboticabal, SP and calibrate this equation. For this purpose we collected data from Jan/01/2009 to Dec/31/2015 in an automated meteorological station installed at Department of Rural Engineering in FCAV / UNESP, Jaboticabal, SP Campus Experimental Area. Data of global solar radiation, liquid radiation, air temperature, relative humidity, and wind speed were collected. The analysis of the results was carried out applying techniques that verify the integrity of the meteorological data as well using methodologies of analysis of the average data and standard deviations of the ET_0 . The local calibration of the Hargreaves equation was performed by adjusting the empirical parameter HE (empirical Hargreaves exponent) of the equation. The integrity of the weather station data was acceptable. The method evaluation result, using the methodology of analysis of daily standard deviation of the ET_0 , considering the Penman-Monteith FAO-56 equation as standard, indicates that it established a linear relation. As a result, they can be compared. The Hargreaves equation is an option to estimate ET_0 values in subtropical climate in places where the climatic data availability is scarce.

KEYWORDS: Hargreaves; Penman-Monteith Penman-Monteith FAO-56; reference evapotranspiration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estação Meteorológica Automática da marca Davis Instruments	5
Figura 2. Estação Meteorológica Automática da marca Campbell Scientific	6
Figura 3. Gráfico que relaciona V com x_{red}^2 (VUOLO, 1996)	19
Figura 4. Radiação solar medida pela estação meteorológica automática da DAVIS e Radiação Solar estimada por três equações das técnicas descritas por Allen (1996).....	21
Figura 5. Soma acumulativa da Velocidade do Vento das estações meteorológicas de Referência e da Davis	22
Figura 6. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica da Davis	22
Figura 7. Soma acumulativa da Temperatura Mínima das estações meteorológicas de referência e da Davis	23
Figura 8. Soma acumulativa da Temperatura Máxima das estações meteorológicas de referência e da Davis.	23
Figura 9. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO -56 (Ano 2009).....	25
Figura 10. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO – 56 (Ano: 2010).....	25
Figura 11. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO – 56 (Ano: 2011).....	26
Figura 12. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO – 56 (Ano: 2012).....	26
Figura 13. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO – 56 (Ano: 2013).....	27
Figura 14. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO - 56 (Ano 2014).....	27
Figura 15 Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO – 56 (Ano: 2015).....	28
Figura 16. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO – 56 (Ano: 2009 - 2015).....	28
Figura 17. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO – 56) e respectivas incertezas (Ano: 2009).....	30
Figura 18. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO - 56) e respectivas incertezas (Ano: 2010)	30

Figura 19. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO - 56) e respectivas incertezas (Ano: 2011)	31
Figura 20. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO - 56) e respectivas incertezas (Ano: 2012)	31
Figura 21. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO - 56) e respectivas incertezas (Ano: 2013)	32
Figura 22. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO - 56) e respectivas incertezas (Ano: 2014)	32
Figura 23. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO - 56) e respectivas incertezas (Ano: 2015)	33
Figura 24. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO - 56) e respectivas incertezas (Ano: 2010, 2012 e 2014)	33

1 INTRODUÇÃO

A utilização da irrigação é uma alternativa para o aumento da produtividade das culturas, que necessitam de um manejo adequado, sendo assim, utilizando-se um método simples de estimativa da evapotranspiração de referência, conhecido como Penman-Monteith FAO 56, que é considerado como padrão requer grandes quantidades de dados meteorológicos, e nem sempre os produtores rurais dispõem dessas informações.

Verifica-se na literatura que para a comparação de métodos simples com o método de Penman-Monteith FAO – 56, recomendada pela FAO como padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), é utilizada a análise de regressão linear e considera o modelo linear ($y = ax + b$), no qual as variáveis dependente são os valores médios diários da estimativa da ET_o pelo método de Penman-Monteith FAO-56 e os valores médios diários da estimativa da ET_o pelo método simples é a variável independente.

Na literatura são escassos os trabalhos que verificam a integridade dos dados meteorológicos para fins de comparação do método padrão com métodos simples. São escassos também, trabalhos que verificam a influência do desvio padrão diário da ET_o na comparação de métodos. Se as linhas de tendências ajustada aos pontos experimentais, obtidas diariamente pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56, e respectivas incertezas não derem uma distribuição linear, não poderá ser utilizada a análise de regressão linear para a comparação dos valores, médios diários da estimativa da ET_o, ou seja, não poderá ser utilizada a estação meteorológica escolhida, ou até mesmo, deverá ser feita a substituição dos sensores por aqueles de maior acurácia.

Com este trabalho, objetivou-se foi avaliar o método de Hargreaves para verificar-se a possibilidade de se estimar a evapotranspiração de referência para as condições climáticas do município de Jaboticabal, SP, comparando-o com o método de Penman-Monteith FAO-56, aplicando-se técnicas que verificam a integridade dos dados meteorológicos e utilizando-se metodologias de análises dos dados médios e

desvios padrões da ET_0 , bem como realizar o ajuste local da equação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O conceito de evapotranspiração de referência (ET_0) foi introduzido por DOORENBOS & PRUITT (1977), sendo a ET_0 definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma 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 (ALLEN et al., 2006). Este conceito foi originalmente introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera, independentemente do tipo de cultura, fenologia e tratos culturais (ALENCAR et al., 2011).

Estimativas da evapotranspiração de referência (ET_0) e coeficientes de cultura (KC) são amplamente utilizados para estimar as necessidades de água de culturas. Essas estimativas são importantes para o planejamento da irrigação (HARGREAVES, 1994).

A equação de Penman-Monteith FAO-56 é padrão para estimar a evapotranspiração de referência (ET_0) na escala diária e mensal em todos os climas, e pode ser utilizada globalmente sem qualquer calibração local e até para estimativas horárias, devido a incorporação de parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos, sendo validada em diferentes ambientes onde utiliza-se medidas precisas obtidas à partir de lisímetros. O processo de cálculo exige medições confiáveis de elementos meteorológicos, tais como a temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento (LIMA JÚNIOR et al., 2016). Porém, há um número limitado de estações meteorológicas nos quais estas variáveis são medidas de modo eficiente. Portanto, a busca por métodos alternativos que demandem menor quantidade de variáveis meteorológicas para estimar a ET_0 têm sido uma solução viável para contornar esse problema (FERNANDES et al., 2012).

Antes de aplicar um método de estimativa da evapotranspiração de referência para determinado local, é necessário verificar o desempenho deste método e, quando necessário, fazer calibrações a fim de minimizar erros de estimativa. Esse

desempenho tem sido analisado com a comparação dos métodos em estudo ao método de Penman-Monteith FAO-56 (CONCEIÇÃO, 2005; PILAU et al., 2012; BORGES JÚNIOR et al., 2012).

A escolha dos métodos de estimativa da evapotranspiração, conforme a sua aplicação variam atendendo às necessidades de precisão e duração dos períodos de cálculo. Pesquisas de recursos hídricos exigem estimativas anuais ou no máximo mensais, mas em projetos de manejo da irrigação, são requeridos períodos mais curtos, de 3 a 10 dias, sendo necessária, portanto a adoção de um método preciso para aquela condição (MACHADO, 2000).

É de grande importância o conhecimento dos métodos mais simples de estimativa da evapotranspiração de referência que demandam dados de fácil obtenção. Os métodos baseados na temperatura do ar têm sido frequentemente utilizados ou recomendados, conforme destacado por Moura et al., (2013). Um método alternativo que vem sendo utilizado por vários estudos (RAZIEI e PEREIRA., 2013; HEYDARI *et al.*, 2014; MEHDIZADEH *et al.*, 2016) é a equação de Hargreaves (HARGREAVES e SAMANI, 1985).

Entre os métodos que podem ser usados com apenas dados de temperatura, destaca-se o de Hargreaves (1994). Tal método pode apresentar correções locais de caráter diário, semanal ou mensal, que podem afetar a precisão da estimativa do método. Existem estudos que mostram que essa equação ajustada pode estimar com acurácia a ETo diária (BERTI *et al.*, 2014; FENG *et al.*, 2017).

O método de Hargreaves (1994) superestima a ETo em locais de clima úmido, conforme observado por Cervantes-Osornio et al. (2013).

O desempenho da equação de Hargreaves (1994) no Vale de Bekaa – Líbano, foi avaliado por Bachour et al. (2013) por meio da comparação com o método de Penman-Monteith FAO-56. Nas condições estudadas a equação de Hargreaves superestimou a ETo diária, semanal e mensal, em 23, 17 e 12 %, respectivamente,

em comparação com a de Penman-Monteith FAO-56.

Mendicino e Senatone (2013) fizeram a calibração local e regional da equação de Hargreaves (1994) para o sul da Itália, comparando-a com a equação de Penman-Monteith FAO-56, utilizando-se dados do período de 1994 a 2011 de 34 estações costeiras e 103 no interior. A melhoria no desempenho da equação regional em relação à original foi de 22%.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental e dados meteorológicos

A pesquisa foi desenvolvida na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal, SP, situada a 21°14'05" de latitude Sul, 48°17'09" de longitude Oeste e altitude de 613,68 m. O clima de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa. Na área experimental foi plantada grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), cobrindo totalmente o solo.

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 sensores de temperatura e umidade relativa do ar, modelo 7859; velocidade do vento, modelo 7911 radiação solar global, modelo 6450, sendo 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.



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 2015.

3.2 Integridade dos dados

A integridade dos dados da estação meteorológica automática da marca Davis Instruments foi avaliada de acordo com as 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*

3.2.1 Radiação Solar

A operação do piranômetro e a precisão da calibração podem ser avaliadas pela delimitação (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:

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

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 predizer 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:

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

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,

ωs = 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 predizer 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: Hargreaves (1994) e Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 2006). A seguir, é descrita a equação original dos métodos que foram utilizados.

3.3.1 Hargreaves

Hargreaves (1994) propôs para o cálculo da evapotranspiração de referência, a seguinte equação:

$$ET_{oH} = 0,0023 RA (T^{\circ}C + 17,8) TD^{0,50} \quad (11)$$

na qual,

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

RA= radiação extraterrestre (mm dia⁻¹)

T °C = T_{max} + T_{min}/2 (temperatura máxima diária do ar mais a temperatura mínima diária do ar, em °C, dividido por dois);

TD = T_{max} - T_{min} (temperatura máxima diária do ar menos a temperatura mínima diária do ar, em °C);

3.3.2 Método do Penman-Monteith FAO-56

Para cálculo da evapotranspiração referência Allen et al.(2006) propuseram:

$$ETo_{PM} = \frac{0,409 \Delta (Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) v (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34v)} \quad (12)$$

na qual,

ETo = evapotranspiração de referência, em gramado, mm d⁻¹;

Rn = 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.

3.3.3 Avaliação dos dados médios

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 FAO-56 e as estimativas da ETo pelo método estudado foi a variável independente.

3.3.4 Técnica de determinação de erros (desvios padrões)

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), conforme a seguir: seja uma quantidade ETo, em que ETo é uma função conhecida de x variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, isto é, $ETo = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$.

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 ΔETo .

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.

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

Para se obter ΔETo 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 percentual 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 a análise dos resultados, considerando os desvios-padrão (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:

$$x \longrightarrow \sigma_x \qquad y \longrightarrow \sigma_{y_0}$$

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:

$$\sigma_y^2 = \sigma_{y_0}^2 + \left(\frac{dy}{dx}\right)_o^2 \sigma_x^2, \text{ em que } (dy/dx)_o \text{ é uma estimativa preliminar da}$$

derivada (dy/dx) . A variância σ_y^2 é a variância original $\sigma_{y_0}^2$ 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 apresenta 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 $f(x, a_1, a_2) = a_1 + a_2x$ 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:

$$f(x, a_1, a_2) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x), \quad \text{na qual} \quad f_1(x) = x, \quad f_2(x) = 1, \quad a_1 = a$$

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

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

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

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 $(x_i; y_i, \sigma_i)$, 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 .

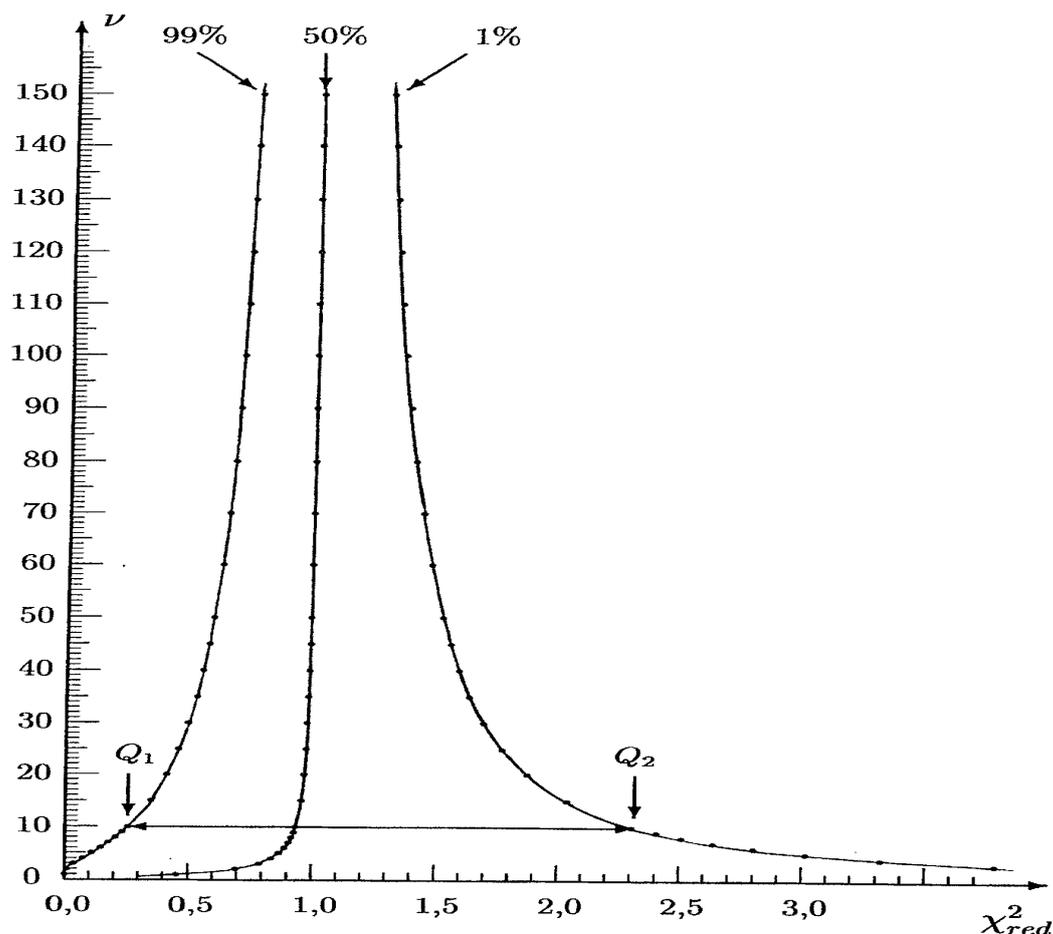


Figura 3. Gráfico que relaciona ν com X_{red}^2 (VUOLO, 1996).

3.7. Calibração local da equação de Hargreaves

Foi realizado a calibração local da equação de Hargreaves (EToHL) por meio do ajuste do parâmetro empírico HE (expoente empírico de Hargreaves) da equação.

$$EToH = 0,0023 RA (T^{\circ}C + 17,8) TD^{HE}$$

na qual,

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

RA= radiação extraterrestre (mm dia⁻¹)

T °C = T_{max} + T_{min}/2 (temperatura máxima diária do ar mais a temperatura mínima diária do ar, em °C, dividido por dois);

TD = T_{max} - T_{min} (temperatura máxima diária do ar menos a temperatura mínima diária do ar, em °C);

HE = expoente empírico.

Para calibração local da equação foi utilizada a metodologia utilizada por TRAJKOVIC (2007), utilizando os dados meteorológicos dos anos ímpares. Para validação da equação foi utilizado os dados meteorológicos dos anos pares. Esta metodologia reduz o efeito bias que pode ocorrer de um ano para o outro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Integridade dos Dados

A partir das técnicas descritas por Allen (1996) foi realizada a análise da integridade dos dados. Os resultados seguintes referem-se ao período de 2009, pois os resultados dos anos seguintes (2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015) apresentaram semelhança.

Na Figura 4 de acordo com a observação da radiação solar medida pela Davis pode-se identificar que a mesma é de qualidade, pois apresenta valores inferiores ao apresentado pela radiação solar que foi estimada pelas equações de

Allen (1996), corroborando com resultados obtidos por Turco e Barbosa (2008) e Oliveira (2014).

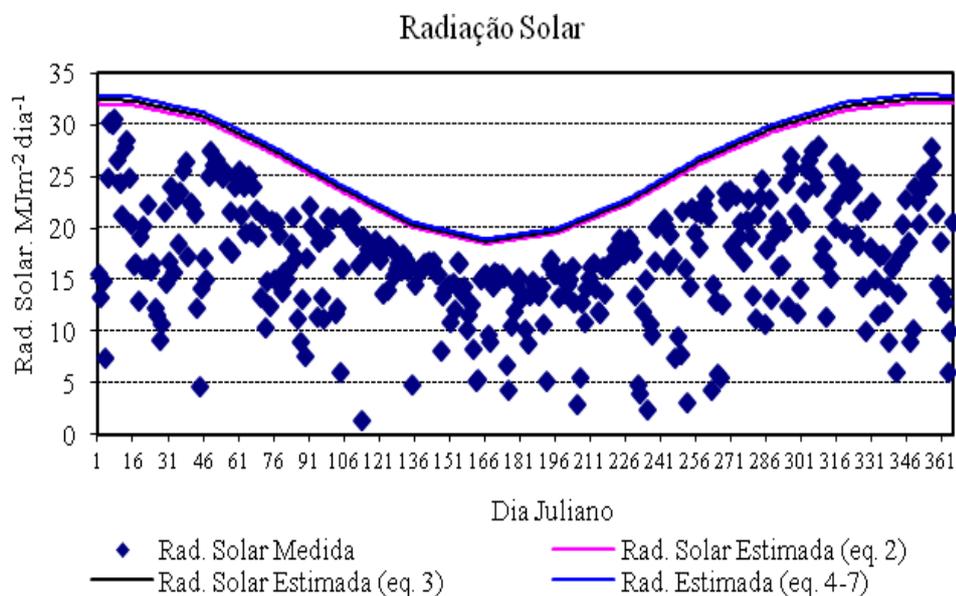


Figura 4. Radiação solar medida pela estação meteorológica automática da DAVIS e Radiação Solar estimada por três equações das técnicas descritas por Allen(1996).

Pode-se verificar na Figura 5 os registros de velocidade do vento das estações meteorológicas, sendo comparados os valores de acordo com a técnica de dupla massa. Foi observado diferença dos valores averiguados na forma acumulativa dos anemômetros e isto se deve ao fato do offset aplicado na programação das estações. A estação Davis e a de referência utilizam respectivamente um offset $0,0 \text{ m s}^{-1}$ e $0,2 \text{ m s}^{-1}$, Turco e Barbosa (2008), em suas pesquisas alcançaram resultados semelhantes quando verificaram os dados emitidos pela Davis em comparação com a estação de referência.

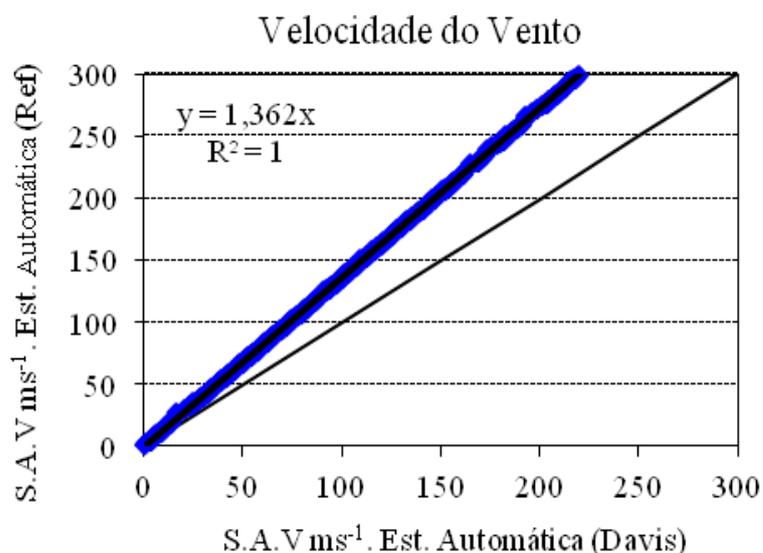


Figura 5. Soma acumulada da Velocidade do Vento das estações meteorológicas de Referência e da Davis.

Com relação a umidade relativa está apresentou valores semelhantes a da estação de referência mostrando que a mesma está com desempenho adequado (Figura 6).

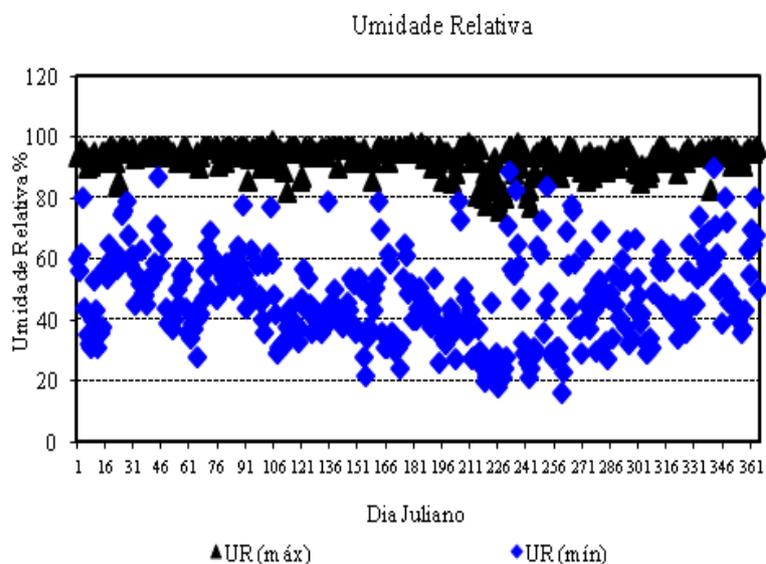


Figura 6. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica da Davis.

Os valores obtidos referentes aos parâmetros temperaturas máxima e mínima apresentaram gráficos com inclinação de reta formando uma ângulo de 45° representados nas Figuras 7 e 8, indicam um alto grau de correlação entre os dados, pois os pontos apresentam-se bem próximos a reta fazendo com que o R^2 seja superior a 0,7 demonstrando assim, boa qualidade dos dados de acordo com Oliveira (2014).

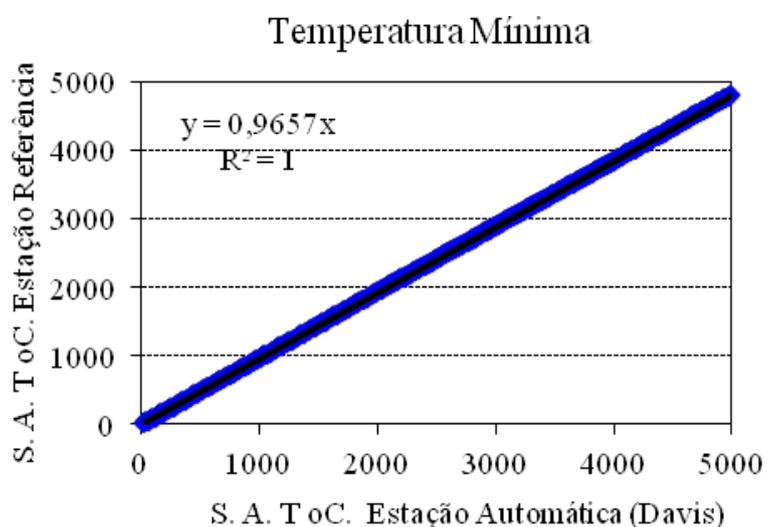


Figura 7. Soma acumulativa da Temperatura Mínima das estações meteorológicas de referência e da Davis.

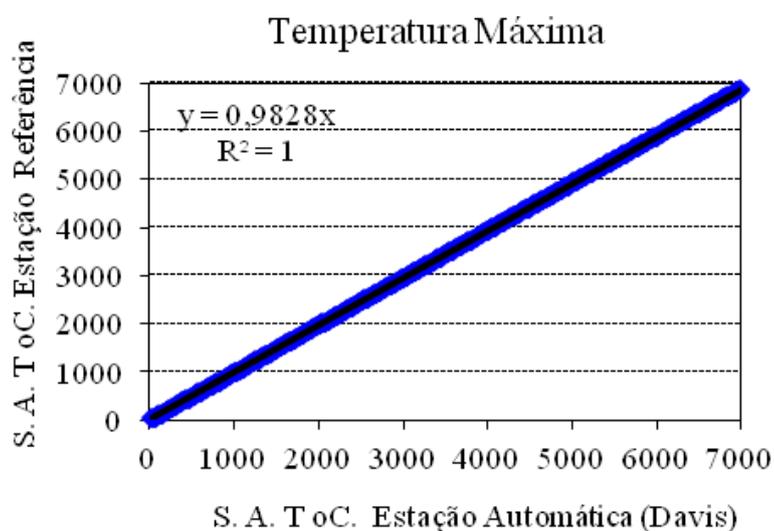


Figura 8. Soma acumulativa da Temperatura Máxima das estações meteorológicas de referência e da Davis.

4.2 Avaliação dos dados médios da ETo

Nas Figuras 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 pode-se observar a correlação dos valores diários da evapotranspiração de referência obtidos por meio do método de Hargreaves, durante os anos de 2009 a 2015 e média dos anos de 2009 a 2015, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56, para região do município de Jaboticabal – SP.

Essas comparações fornecem a base para avaliar os valores diários da ETo, obtidos pelo método de Hargreaves em relação aos obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56. Se os valores diários da ETo obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56 forem semelhantes aos obtidos pelo método de Hargreaves a linha de regressão deveria sobrepor-se à reta $y = x$, e os pares de pontos deveriam estar próximos à linha de regressão.

Quando a linha de regressão estiver afastada da reta $y = x$, e os pares de pontos estiverem próximos à linha de regressão, isso significa que os valores obtidos pelo método de Hargreaves apresentam uma diferença aceitável em relação aos obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56, ou seja, a equação pode ser utilizada com precisão para fazer a correção dos valores obtidos pelo método Hargreaves em relação aos obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56.

Observa-se nas Figuras 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 que a linha de regressão obtida pelos valores da ETo obtidos pelo método de Hargreaves, durante os anos de 2009 a 2015 e média dos anos de 2009 a 2015, em relação aos obtidos pelo método de Penman-Monteith FAO-56 superestimaram a ETo. Referente também as figuras, percebe-se que os pares de pontos não estão dispersos ao redor da linha de

regressão, indicando uma adequada correlação, podendo-se observar isto também por meio do coeficiente de determinação R^2 .

Resultados semelhantes foram obtidos por Bachour et al. (2013), no Vale de Bekaa – Líbano, onde o método Hargreaves (1994) superestimou a ETo em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56.

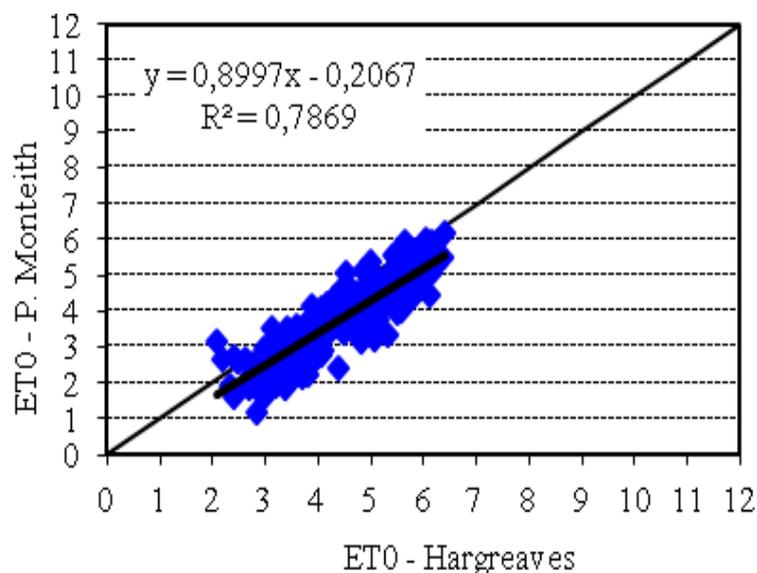


Figura 9. Correlação entre os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Ano: 2009).

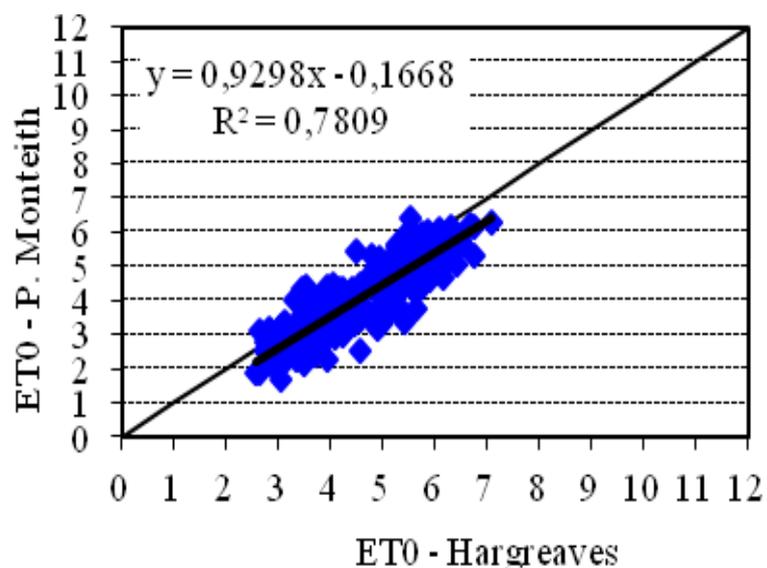


Figura 10. Correlação entre os valores diários da ET_0 , obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Ano: 2010).

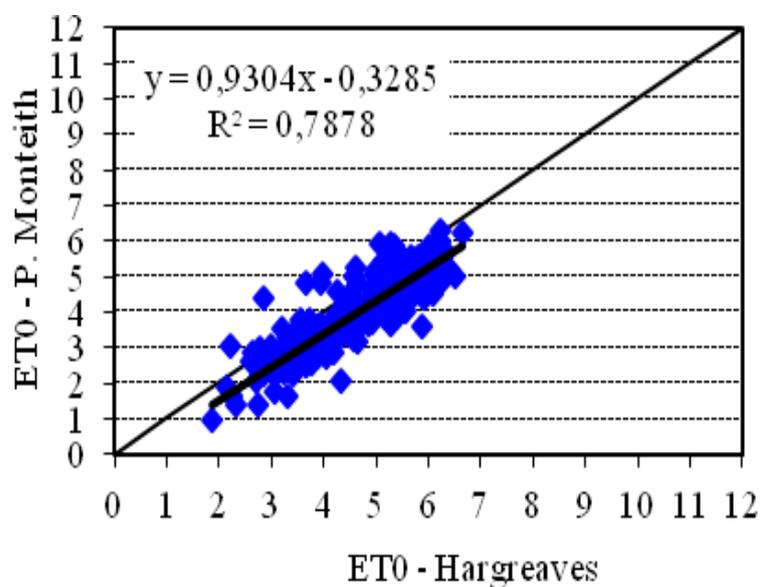


Figura 11. Correlação entre os valores diários da ET_0 , obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Ano: 2011).

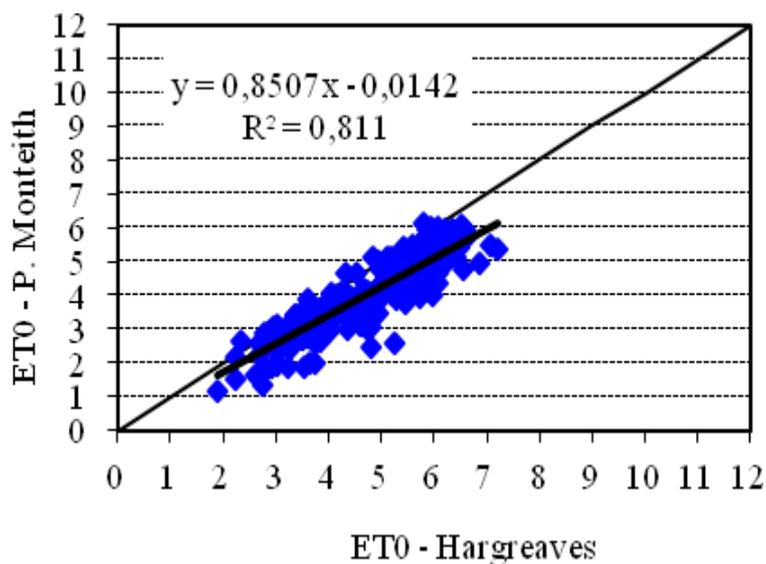


Figura 12. Correlação entre os valores diários da ET_0 , obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Ano: 2012).

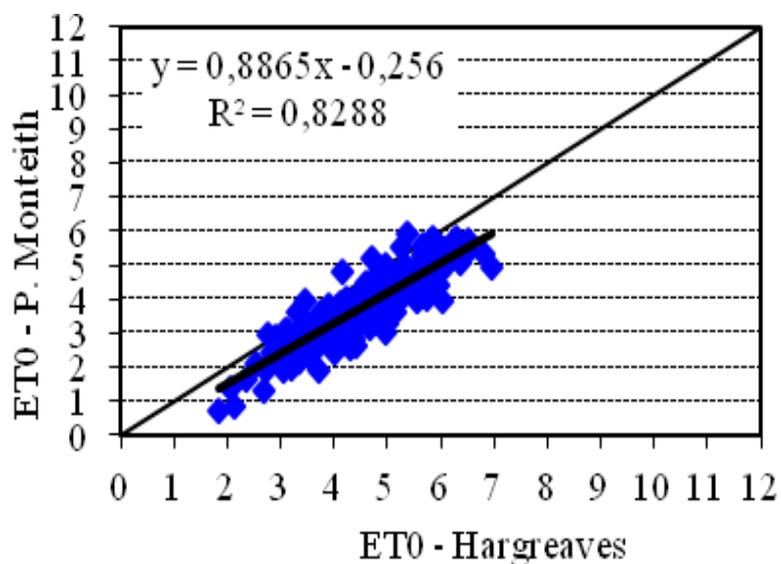


Figura 13. Correlação entre os valores diários da ET_0 , obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Ano: 2013).

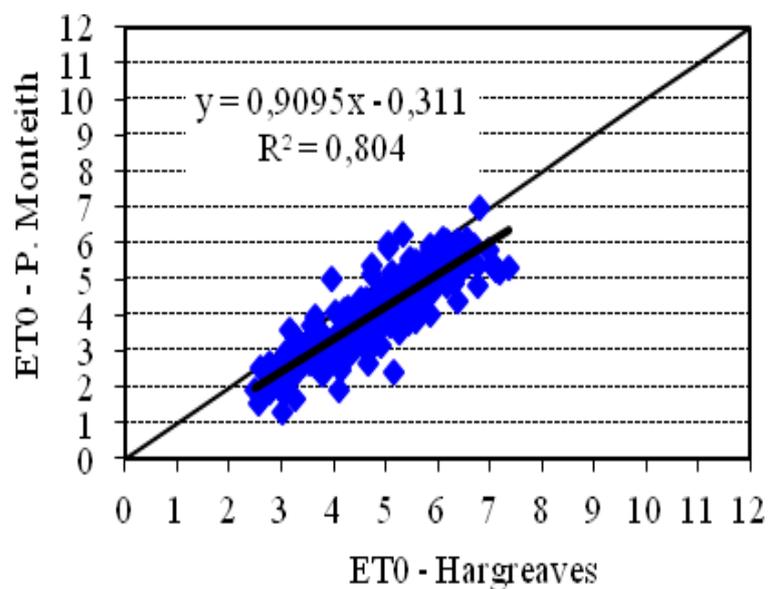


Figura 14. Correlação entre os valores diários da ET₀, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Ano: 2014).

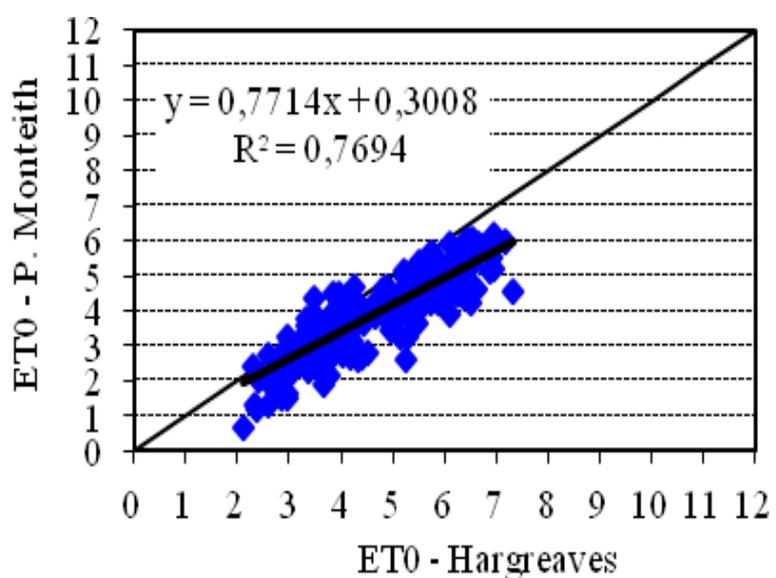


Figura 15. Correlação entre os valores diários da ET₀, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Ano: 2015).

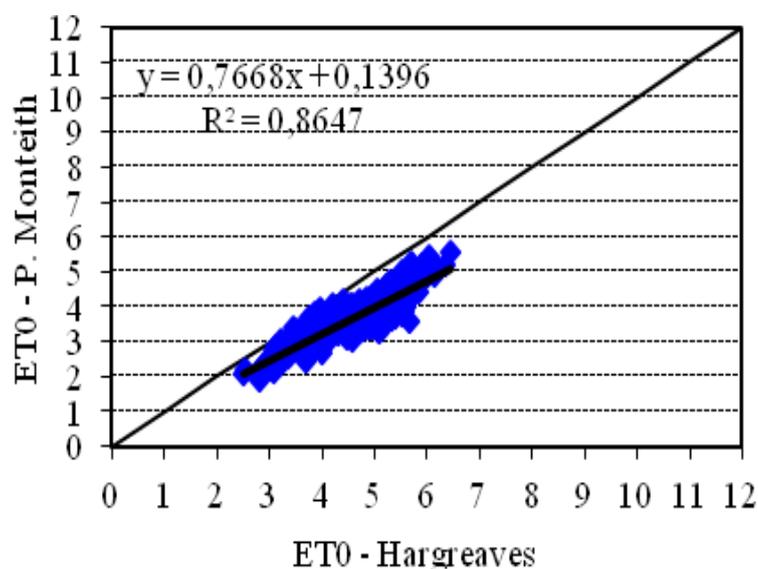


Figura 16. Correlação entre os valores diários da ETO, obtidos com o método estudado, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Ano: 2009-2015).

4.3 Avaliação dos desvios padrões da ETO

As Figuras 17, 18, 19, 20, 21, 22 e 23 apresentam as retas $y = ax + b$ ajustadas aos pontos experimentais, obtidos diariamente pelo método estudado, nos anos de 2009 a 2015, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56 e respectivas incertezas.

No ajuste das retas para o método de Hargreaves (Figura 7), $\chi_{red}^2 = 0,9; 1,1; 1,01; 0,87; 1,00; 0,93; 1,04$ ($\nu = 235$), para os anos de 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015, respectivamente. De acordo com VUOLO (1996), os valores de qui-quadrado reduzido (χ_{red}^2) estão dentro da faixa de valores aceitáveis, portanto considerados bons ajuste.

De acordo com a estatística há 98% de confiança, que o método estudado e o método de Penman-Monteith não são distintos, assim podem ser comparados.

O Resultado obtido foi similar ao de Lacerda e Turco (2015), que compararam método de estimativa da ETo de Hargreaves com o método de Penman-Monteith FAO-56, em Uberlândia, MG, utilizando-se a metodologia de análise de desvios padrões diários da ETo.

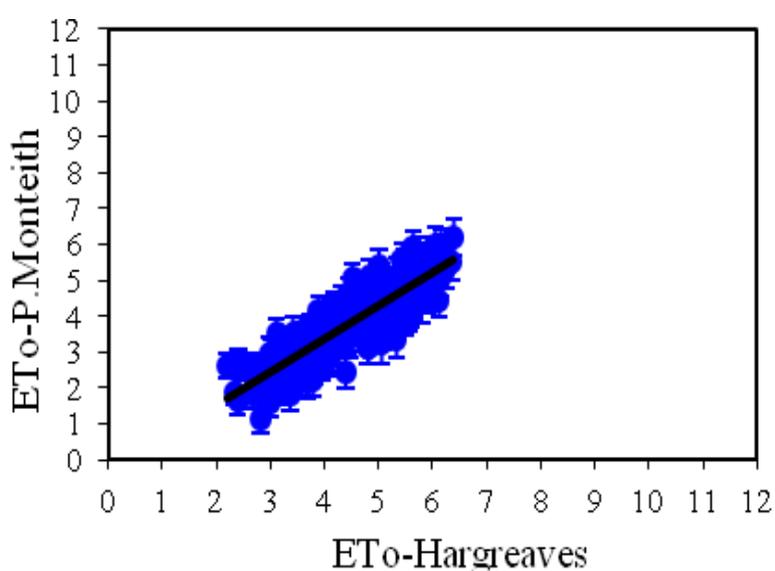


Figura 17. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56) e respectivas incertezas (Ano: 2009).

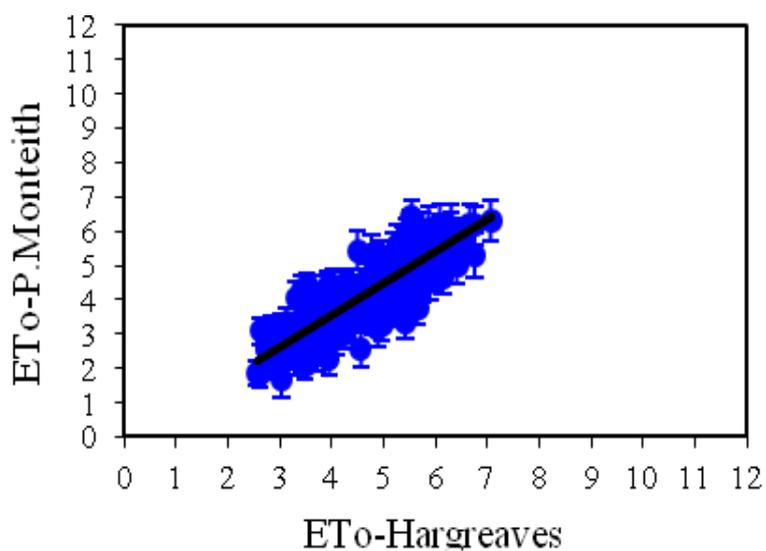


Figura 18. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56) e respectivas incertezas (Ano: 2010).

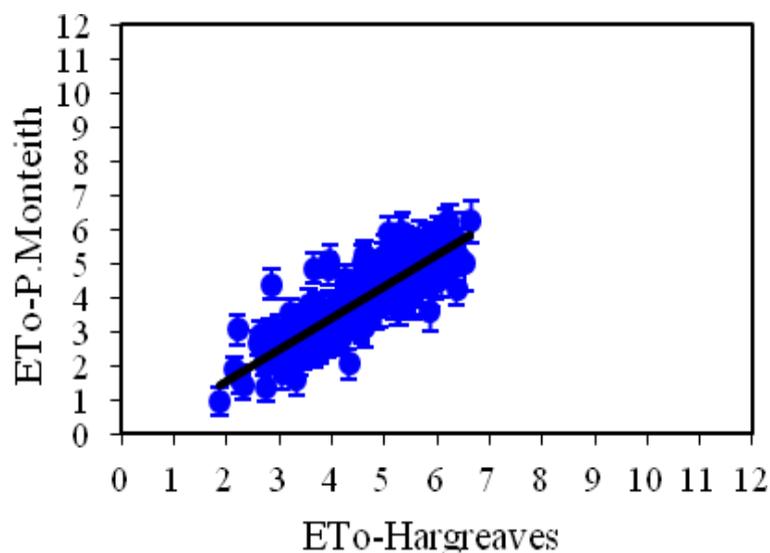


Figura 19. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56) e respectivas incertezas (Ano: 2011).

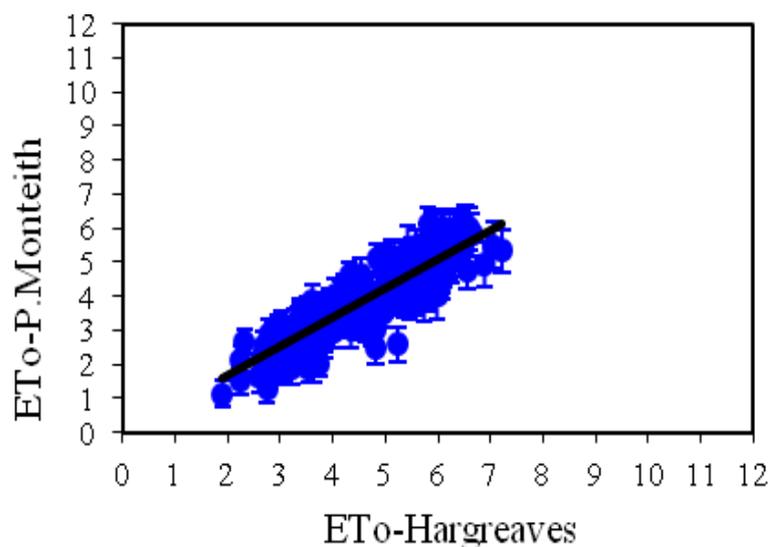


Figura 20. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56) e respectivas incertezas (Ano: 2012).

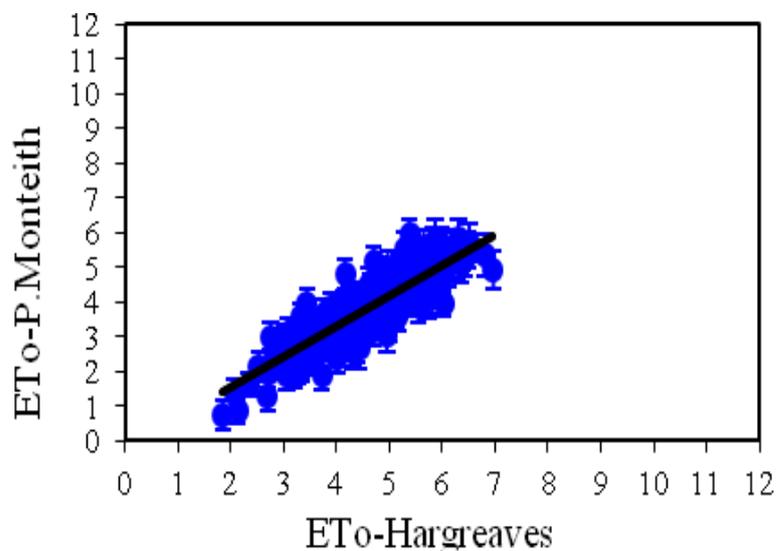


Figura 21. Reta $y = ax + b$ ajustada aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ETo, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56) e respectivas incertezas (Ano: 2013).

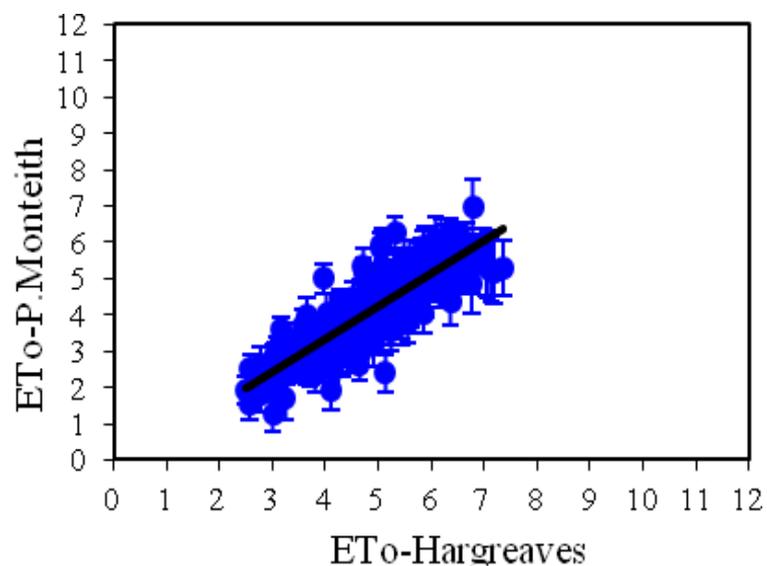


Figura 22. Retas $y = ax + b$ ajustadas aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ET₀, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56) e respectivas incertezas (Ano: 2014).

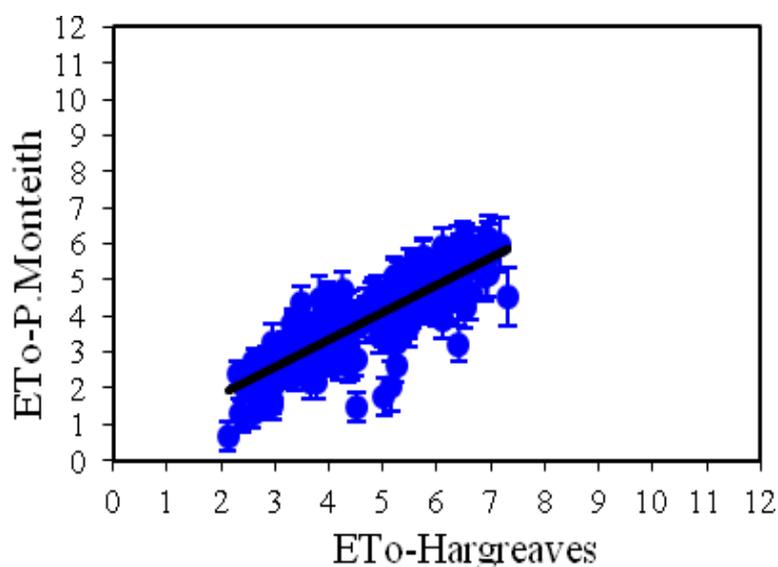


Figura 23. Retas $y = ax + b$ ajustadas aos pontos experimentais (correlação entre os valores diários da ET₀, obtidos pelo método estudado, em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56) e respectivas incertezas (Ano: 2015).

4.4 Equação de Hargreaves calibração

Na Figura 24 pode-se observar a correlação dos valores diários da evapotranspiração de referência obtidos por meio da equação de Hargreaves com calibração local (EToHL), durante os anos de 2010, 2012 e 2014 em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56, para região do município de Jaboticabal – SP.

Observa-se na Figura 24 que a linha de regressão sobrepõe a reta $y = x$, e os pares de pontos estão próximos à linha de regressão, indicando uma adequada correlação, podendo-se observar isto também por meio do coeficiente de determinação R^2 .

Por meio da calibração local da equação de Hargreaves (EToHL) foi obtido o valor de $HE = 0,424$. O valor obtido corrobora com o obtido por TRAJKOVIC (2007).

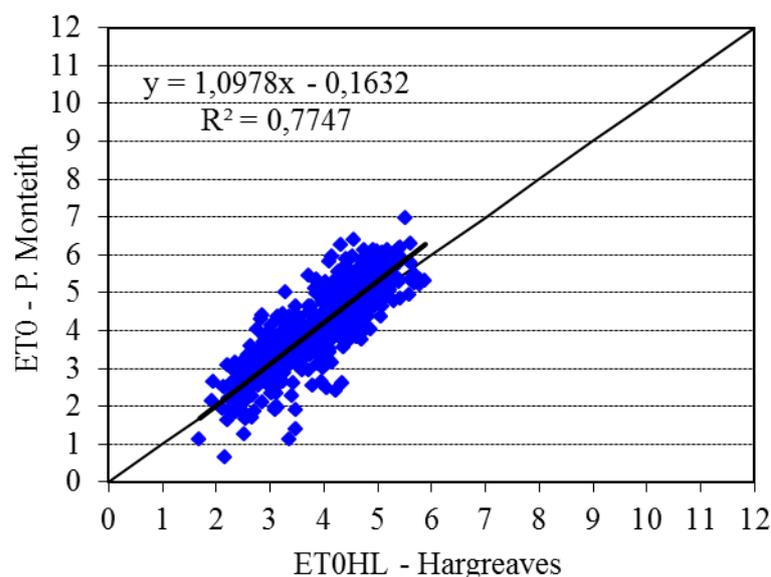


Figura 24. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método estudado com calibração local, em relação ao Penman-Monteith FAO-56 (Anos: 2010, 2012 e 2014).

5 CONCLUSÕES

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

A equação de Hargreaves apresentou um bom ajuste para estimativa da ET_0 , considerando-se a análise de regressão e a metodologia que verifica a influência do desvio padrão diário da ET_0 .

A equação de Hargreaves com calibração local é uma alternativa para estimar a ET_0 diária em locais em que a disponibilidade de dados meteorológicos é limitada.

6 REFERÊNCIAS

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. 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. **Evapotraspiration del cultivo: guias para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estúdio FAO Riego y Drenaje Paper, 56).

BACHOUR, R.; WALKER, W.R.; TORRES-RUA, A.F.; MCKEE, M. Assessment of reference evapotranspiration by the Hargreaves method in the Bekaa Valley, Lebanon. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 139, n. 11, p. 933-938, 2013.

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, 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.

BERTI, A. et al. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in

north eastern Italy. **Agricultural Water Management**. v.140, p.20-25, 2014.

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.

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.

CERVANTES-OSORNIO, R.; ARTEAGA-RAMÍRES, R.; VÁZQUEZ-PEÑA, M.A.; OJEDA-BUSTAMANTE, W.; QUEVEDO-NOLASCO, A. Modelos Hargreaves Priestley-Taylor y redes neuronales artificiales en la estimación de la evapotranspiración de referencia. **Ingeniería Investigación y Tecnología**. v. XIV, n. 2, p. 163-176, 2013.

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

FOOLADMAND, H.R.; ZANDILAK, H.; RAVANAN, M.H. (2008). “**Comparison of different types of Hargreaves equation for estimating monthly evapotranspiration in the south of Iran**”. Archives of Agronomy and Soil Science 54, pp. 321-330.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.F.; AMORIN, A. O. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de

referência. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n.2, p. 246-255, 2012. FENG, Y. et al. Calibration of Hargreaves model for reference evapotranspiration estimation in Sichuan basin of southwest China. **Agricultural Water Management**. v.181, p.1-9, 2017.

GAVILÁN, P. et al. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. **Agricultural Water Management**. v.81, n.3, p.257-281, 2006.

HARGREAVES, G.H.; ALLEN, R.G. "History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation". **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. V. 129, p. 53-63, 2003.

HARGREAVES, G.H. Defining and using reference evapotranspiration. **J. Irrig. Drain. Eng**, v.120, n.6, p.1132-1139, 1994.

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

HEYDARI, M.M; HEYDARI, M. "Calibration of Hargreaves-Samani equation for estimating reference evapotranspiration in semiarid and arid regions". Archives of Agronomy and Soil Science , p. 695-713, 2014.

LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D.A.; OLIVEIRA, J. B.; NASCIMENTO, F.A.L.; MACÊDO, K.G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n.3, p. 447-454, 2016.

MOURA, A.R.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; AZEVEDO, J.R.G.; SILVA, B.B.; Oliveira, L.M.M.. Evapotranspiração de referência baseada em métodos

empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco - Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v.28, p.181-191. 2013.

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.

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.

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, n. 10, p. 2187-2201, 2010.

MEHDIZADEH, S.; SAADATNEJADGHARAHASSANLOU, H.; BEHMANESH, J. "Calibration of Hargreaves-Samani and Priestley – Taylor equations in estimating reference evapotranspiration in the Northwest of Iran". *Archives of Agronomy and Soil Science*, p. 1-14, 2016.

MENDICINO, G.; SENATONE, A. Regionalization of the Hargreaves coefficient for assessment of distributed reference evapotranspiration in southern Italy. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. v. 139, n. 5, p. 349-362, 2013.

NANDAGIRI, L.; KOVOOR, G.M. Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 132, p. 238-249, 2006.

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.

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.

RAZIEI, T.; PEREIRA, L.S. Estimation of ET_o Hargreaves – Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Management**. v.121, p.1-18, 2013.

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

TRAJKOVIC, S. “Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** v.133, p. 38-42, 2007.

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. **Water Resource Management**, Amsterdam, v. 23, n. 14, p. 3057-3067, 2009.

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. ; PERECIN, D. ; PINTO JUNIOR, 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.; 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**. Botucatu-SP, v.13, n.3, p.339-354. 2008.

VUOLO, J.E. **Fundamentos da teoria de erros**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1996. 249p.

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

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 cal/cm²dia).

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