

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

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELAS
EQUAÇÕES DE HARGREAVES NA MESORREGIÃO DO
TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO PARANAÍBA – MG**

Lucas Hordones Chaves

Engenheiro Agrônomo

2017

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

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELAS
EQUAÇÕES DE HARGREAVES NA MESORREGIÃO DO
TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO PARANAÍBA – MG**

Lucas Hordones Chaves

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

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

2017

C512e Chaves, Lucas Hordones
Evapotranspiração de referência pelas equações de Hargreaves
na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – MG / Lucas
Hordones Chaves. – – Jaboticabal, 2017
vii, 67 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017

Orientador: José Eduardo Pitelli Turco

Banca examinadora: Antônio Carlos Barreto, Renato Farias do
Valle, José Renato Zanini, David Luciano Rosalen

Bibliografia

1. Ajuste de método. 2. Expoente empírico HE. 3. Temperatura do
ar. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias.

CDU 632.11:519.2


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELAS EQUAÇÕES DE HARGREAVES NA MESORREGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO PARANAÍBA - MG

AUTOR: LUCAS HORDONES CHAVES

ORIENTADOR: JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO

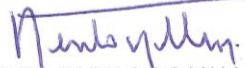
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



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



Prof. Dr. ANTONIO CARLOS BARRETO
Irrigação e Drenagem / IFTM - Uberaba, MG



Prof. Dr. RENATO FARIAS DO VALLE JUNIOR
Meio Ambiente - Água e Solo / IFTM - Uberaba, MG



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



Prof. Dr. JOSÉ RENATO ZANINI
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 15 de setembro de 2017

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. Ingressou no Doutorado, em março de 2016, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista.

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. À minha irmã, pela irmã que é.

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 pelos conhecimentos transmitidos no doutorado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA, pelo apoio para a realização do doutorado em concomitância ao trabalho.

Ao professor José Eduardo Pitelli Turco, pela orientação e amizade 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 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 e o método de estimativa da evapotranspiração de referência padrão da FAO	3
2.2 Aquisição automática de dados e integridade dos dados	6
2.3 Hargreaves	9
2.4 Análise das equações de Hargreaves.....	11
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1 Área de estudo e dados metereológicos	13
3.2 Integridade dos dados.....	15
3.2.1 Radiação Solar	16
3.2.2 Umidade do Ar.....	19
3.2.3 Velocidade do Vento	20
3.2.4 Temperatura do Ar e Precipitação Pluviométrica.....	20
3.2.4.1 Técnicas de “Análise de Dupla Massa”	20
3.3 Evapotranspiração de referência.....	21
3.3.1 Equação de Hargreaves (1976).....	22
3.3.2 Equação de Hargreaves e Samani (1985)	22
3.3.3 Equação de Hargreaves (1994).....	23
3.3.4 Equação do Penman-Monteith (PM)	23
3.4 Ajuste do Expoente Empírico de Hargreaves (HE).....	24
3.5 Avaliação dos dados	25
3.6 Desempenho das equações de Hargreaves e Samani (1985) e Hargreaves (1994).....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28

4.1 Integridade dos Dados	28
4.2 Avaliação da Equação Hargreaves (1976).....	33
4.3 Avaliação da Equação de Hargreaves e Samani (1985).....	35
4.4 Avaliação da Equação de Hargreaves (1994).....	39
4.4 Avaliação do desempenho das equações de Hargreaves e Samani (1985) e Hargreaves(1994) - EToHSR x EToHGR	42
5 CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS	44
A N E X O	53

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELAS EQUAÇÕES DE HARGREAVES NA MESORREGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO E ALTO PARANAÍBA - MG

RESUMO - A estimativa da evapotranspiração de referência é importante para o manejo da irrigação. A FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) recomenda utilizar a equação de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o). Esta equação apresenta um nível de exigência de dados de entrada que dificultam sua aplicação. Com isso, a FAO-56 recomenda que em regiões nas quais tais elementos meteorológicos nem sempre se encontram disponíveis, utilize-se a equação de Hargreaves e Samani. Com este trabalho, objetivou-se verificar a eficiência de três equações de Hargreaves, uma que emprega a radiação solar e a temperatura do ar e duas que utilizam a medição da temperatura do ar para estimativa da ET_o, comparando-as com a equação de Penman-Monteith, nas condições climáticas da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – MG, e fazer a calibração local e regional das equações, baseadas na temperatura do ar. Foram utilizados dados médios diários dos anos de 2009 a 2015, de radiação solar global, velocidade do vento, temperatura do ar e umidade relativa do ar, obtidos em estações meteorológicas automáticas. A análise dos resultados foi realizada por meio da aplicação de técnicas que verificaram a integridade dos dados meteorológicos e para avaliação da estimativa da ET_o, adotaram-se metodologias de análise dos dados médios e de desempenho das estimativas. Foi realizada a calibração local e regional das equações de Hargreaves por meio do ajuste do parâmetro empírico HE (expoente empírico de Hargreaves) das equações. As equações de Hargreaves ajustadas para o processo regional apresentaram valores de ERQM de 12,45 e 13,14%, respectivamente, considerando adequado para o conjunto de dados climáticos. As equações de Hargreaves são uma alternativa eficiente para estimar a ET_o diária em locais do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, em que a disponibilidade de dados climáticos é limitada.

PALAVRAS-CHAVE: ajuste de método, expoente empírico HE, temperatura do ar

REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION BY THE HARGREAVES EQUATIONS IN MESOREGION THE TRIÂNGULO MINEIRO AND ALTO PARANAÍBA-MG

ABSTRACT - The estimation of reference evapotranspiration is important for irrigation management. The FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) recommends the Penman-Monteith equation to estimate reference evapotranspiration (ET_o). This equation presents a level of input requirement that makes it difficult to apply. So, FAO-56 recommends, in regions where such meteorological elements are not always available, the use of the equation of Hargreaves and Samani. This work aimed to verify the efficiency of three Hargreaves equations, one that uses solar radiation and air temperature and two that uses the air temperature measurement to estimate ET_o, comparing them with the Penman-Monteith, in the climatic conditions of the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba - MG mesoregion, as well as to make the local and regional calibration of the equations based on the air temperature. Daily average data from the years 2009 to 2015 of global solar radiation, wind speed, air temperature and relative humidity of the air obtained in automatic meteorological stations were used. The analysis of the results was performed through the application of techniques that verified the integrity of the meteorological data and to estimate the ET_o, here adopted methodologies for the analysis of the average data and the performance of the ET_o estimates. The local and regional calibration of the Hargreaves equations was performed by adjusting the empirical parameter HE (empirical exponent of Hargreaves) of the equations. The Hargreaves equations adjusted for the regional process showed ERQM values of 12.45 and 13.14%, respectively, considering the climatic data set. The Hargreaves equations are an efficient alternative to estimate the daily values of ET_o in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba mesoregion, places where the availability of climatic data is limited.

KEYWORDS: method adjustment, HE empirical exponent, air temperature

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tabela informativa da localização das estações automáticas utilizadas.....	14
Tabela 2. Valores do coeficiente de confiança e sua classificação.	26
Tabela 3. Valores do coeficiente de correlação e sua classificação.....	26
Tabela 4. Valores do coeficiente de correlação (r), de concordância (d), de confiança (índice c), de determinação (R^2) e equação ($y=ax$) para o método de Hargreaves (1976).....	33
Tabela 5. Valores do expoente empírico (HE), do coeficiente de determinação (R^2), de correlação (r), de concordância (d) e de confiança (índice c) para o método de Hargreaves e Samani (1985), antes e após a calibração do HE.	36
Tabela 6. Valores do expoente empírico (HE), do coeficiente de correlação (r), de concordância (d), de confiança (índice c) e de determinação (R^2) para o método de Hargreaves (1994) antes e após a calibração do HE.....	39
Tabela 7. Desempenho das equações EToHSR e EToHGR ajustadas para o processo local e regional.....	42

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa com a localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas no estudo. 13
- Figura 2.** Estação Meteorológica Automática – EMA. Ao centro a antena de comunicação via satélite, à direita o “datalogger” com sensor de temperatura presos ao mastro e à esquerda o pluviômetro. 15
- Figura 3.** Localização e respectivas distâncias entre as estações meteorológicas automáticas e o posto meteorológico mais próximo da estação, na área de estudo. 16
- Figura 4.** Radiação solar medida pela estação meteorológica automática de Uberlândia em 2009 e Radiação Solar estimada por três equações das técnicas descritas por Allen (1996). 29
- Figura 5.** Soma acumulativa da Velocidade do Vento da estação meteorológica automática de Uberlândia e o posto meteorológico de Uberaba, em 2009. 30
- Figura 6.** Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica automática de Uberlândia, em 2009. 31
- Figura 7.** Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima do posto meteorológico de Uberaba, em 2009. 31
- Figura 8.** Soma acumulativa da Temperatura Mínima da estação meteorológica automática de Uberlândia e do posto meteorológico de Uberaba, ano 2009. 32
- Figura 9.** Soma acumulativa da Temperatura Mínima da estação meteorológica automática de Uberlândia e do posto meteorológico de Uberaba, ano 2009. 32
- Figura 10.** Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Hargreaves (1976), em relação ao Penman-Monteith, para a região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro. 35
- Figura 11.** Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Hargreaves (1985), em relação ao Penman-Monteith, para a região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro. 38
- Figura 12.** Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de

Hargreaves (1994), em relação ao Penman-Monteith, para a região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro.....41

1 INTRODUÇÃO

A mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – MG apresenta uma área com produtividade de café, grãos, cana-de-açúcar e frutíferas, entre outros alimentos, e está localizada no Bioma Cerrado. Na mesorregião existe o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, pelo qual se instituiu aos usuários a cobrança pelo uso do recurso hídrico da Bacia, a primeira iniciativa no País (Resolução CBH-Araguari nº 12, de 25 de junho de 2009).

A irrigação adequada tem por base a estimativa diária da evapotranspiração de referência (ET_o), sendo um parâmetro agrometeorológico indispensável para o planejamento e o manejo de irrigação, e considerada elemento de balanço hídrico, daí sua aplicação em estudos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos (CARVALHO et al., 2011).

Os dados meteorológicos provenientes das estações automáticas devem apresentar qualidade para a estimativa da ET_o e manter o adequado uso do recurso hídrico. Se os erros da estimativa da ET_o forem considerados, a avaliação da eficiência dos métodos para a estimativa da ET_o se torna mais consistente e ajustada, otimizando a eficiência do manejo da água (TURCO et al., 2008). Avaliações da integridade e qualidade dos dados meteorológicos precisam ser realizadas antes dos dados serem utilizados em equações de estimativa da ET_o (OLIVEIRA, 2014).

O método recomendado pelo boletim da FAO56 é Penman-Monteith, que mais se aproxima do lisímetro, 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, e é recomendado por Allen et al. (1998). Entretanto, requer um conjunto amplo de dados que impõe obstáculos à sua difusão.

Allen et al. (1998) propõem como alternativa o uso de equação de Hargreaves e Samani para a estimativa da evapotranspiração, quando disponíveis os dados de temperatura do ar, contanto que se realize uma calibração local para um desempenho aceitável (GAVILÁN et al., 2006). Essa calibração deve ser realizada

por meio de ajustes dos coeficientes, tendo em vista que calibrações utilizando apenas regressão linear superestimaram os valores da ETo quando comparadas aos valores obtidos por Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 1994; TRAJKOVIC, 2007).

Fernandes et al. (2012) concluíram que o método Hargreaves (1994), para estimar a ETo 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. O método de Hargreaves pode ser empregado pelos produtores para o manejo da irrigação (NOIA et al., 2014).

Objetivou-se, neste trabalho, testar a eficiência das equações de Hargreaves para a estimativa da ETo, comparando-as com o método de Penman-Monteith, nas condições climáticas da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – MG, bem como fazer a calibração local e da mesorregião de duas equações, por meio do ajuste do parâmetro empírico HE (expoente empírico de Hargreaves).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração de referência e o método de estimativa da evapotranspiração de referência padrão da FAO

A evapotranspiração – ET foi conceituada pela primeira vez por Warren Thornthwaite em 1944, sendo a ocorrência simultânea, numa superfície vegetada, dos processos de transpiração e evaporação (CAMARGO, 1962). De acordo com Sedyama (1998) o conceito proposto por Thornthwaite era para tentar definir as diferenças regionais do clima e explicar as variações sazonais do balanço de água no solo.

Segundo Liang et al.(2009) a evapotranspiração exerce grande influência sobre os processos hidrológicos, sendo a principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, estando estreitamente relacionada com a recarga dos aquíferos, o escoamento superficial e a dinâmica da umidade do solo.

Os modelos de balanço hídrico são empregados com a finalidade de manejar e dimensionar irrigação na agricultura ou estudar as probabilidades de ocorrências de excessos hídricos ou estiagens (BACK, 2007). Nesses modelos a entrada de água no sistema é a precipitação ou a irrigação e saída é a evapotranspiração.

O tipo da cultura, a variedade, a densidade e a fase de desenvolvimento afetam a evapotranspiração, já que há diferenças na altura da cultura, rugosidade do dossel, resistência estomática, refletividade e cobertura do solo pela vegetação, pois resultam em variados valores de ET sob as mesmas condições de solo e climáticas (ALLEN et al., 1998).

Howard Penman, em 1948, apresentou um método que proporciona a estimativa da taxa de evaporação da água livre, envolvendo processos físicos, provenientes da vegetação e da umidade da superfície do solo, para ser estimada a partir dos elementos climáticos relevantes: temperatura, energia radiante, velocidade do vento e umidade (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Nesse método combinou um termo aerodinâmico com o balanço de energia na superfície resultando na equação

conhecida como equação original de Penman (SEDIYAMA, 1996).

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

A evapotranspiração é o processo oposto à chuva e controlado pelo balanço de energia, pelo suprimento de água do solo à vegetação, pelas características fisiológicas das plantas e pela demanda atmosférica, tendo influência direta no ciclo hidrológico (MENDONÇA et al., 2003, PEREIRA et al., 1997).

A precisão nas estimativas da evapotranspiração (ET) é fundamental para identificar as variações temporais e quantitativas sobre a necessidade de irrigação, para melhorar a alocação dos recursos hídricos e avaliar as mudanças na gestão do balanço hídrico e o efeito do uso da terra (ORTEGA-FARIAS et al., 2009).

O termo evapotranspiração de referência – ETo foi introduzido nos anos 1970, segundo Jensen (1973), a ETo é aquela que ocorre numa cultura padrão. Doorenbos e Pruitt (1977) definiram como ETo a evapotranspiração que ocorre em extensa área de grama com altura de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo o solo e sem restrição hídrica. Sendo ideal uma condição que incorporasse todos os fatores que influenciam a evapotranspiração, tais como a morfologia da planta, estágio de crescimento, a taxa de crescimento da cobertura da superfície pela planta, 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).

A evapotranspiração de referência (ETo) é uma informação e parâmetro agrometeorológico indispensável para o planejamento e manejo de irrigação (CARVALHO et al., 2011). A evapotranspiração das culturas é estimada com base no coeficiente de cultura e nos valores da evapotranspiração de referência.

A fim de comparar a evapotranspiração em diferentes regiões, a FAO (Food and Agriculture Organization) propôs a evapotranspiração de referência (ETo), definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência com altura de 0,12 m, uma resistência de superfície de 70 s.m^{-1} e um albedo de 0,23, considerando como superfície de referência uma cultura hipotética com altura

uniforme, sem sofrer estresse hídrico, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo (ALLEN et al., 1998).

Após a publicação do boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998), o método de Penman-Monteith/FAO (PM) é recomendado e aceito (PEREIRA et al., 2015) como o método-padrão para determinar a ETo, mesmo considerando que, em condições climáticas especiais, pode levar a erros próximos a 30% (WIDMOSER, 2009), comparado com o método direto do lisímetro. Este modelo padrão para a estimativa de ETo requer para sua aplicação, dados de entrada necessários para o cálculo, como temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998).

Nem sempre esses dados para método de padrão estão disponíveis, na maioria das estações climatológicas, especialmente em países em desenvolvimento (BACHOUR, 2013). Para superar o problema da disponibilidade de dados climáticos, o boletim 56 da FAO propõe vários procedimentos para estimar a ETo na ausência dos dados de radiação, umidade relativa e velocidade do vento, e posterior substituição (CONCEIÇÃO, 2013).

Considerando a indisponibilidade de dados para o método de Penman-Monteith outra opção é utilizar métodos com boa base física e teórica que incorpora os parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos. Os diversos métodos para estimar a evapotranspiração de referência, nas suas performances, em diferentes ambientes, variam, já que a todos apresentam empirismo em sua concepção (SENTELHAS et al., 2010). Existem aqueles mais simples, exigindo apenas a temperatura do ar e a latitude do lugar como os de Hargreaves, que o boletim da FAO-56 recomenda se houver a indisponibilidade dos demais dados (VEGA & JARA, 2009).

Por cada região apresentar características climáticas diferentes os resultados de estimativa de evapotranspiração variam muito, o que dificulta ao usuário decidir sobre a conveniência de qual adotar. Como as equações empregadas na estimativa da evapotranspiração são empíricas, o que as limita a serem usadas para locais e climas similares àqueles em que foi efetuada sua determinação (ALENCAR et al., 2011).

2.2 Aquisição automática de dados e integridade dos dados

A difusão e a evolução tecnológica das estações meteorológicas automáticas a partir dos anos 60 (WMO, 1967) têm proporcionado rapidez e precisão na ordenação e coleta dos dados climáticos, facilitando o uso nas estimativas da ETo, principalmente nos métodos simplificados, com menos dados meteorológicos de entrada requeridos (BAUSCH, 1990). Um monitoramento mais rápido e eficiente das condições atmosféricas para o manejo dos recursos hídricos durante todo o período de cultivo é auxiliado principalmente pela coleta automatizada de dados quando possível.

O armazenamento de dados meteorológicos por um longo período de tempo a um custo relativamente baixo, se tratando de país, é proporcionado pelas medições mais precisas e acuradas das estações meteorológicas automáticas (TANNER, 1990). Infelizmente para os produtores rurais a obtenção desses dados requer, todavia, equipamentos de maior custo (EXNER-KITTRIDGE & RAINS, 2010) para sua realidade, não possibilitando sua aquisição local.

O sistema de aquisição automática de dados com maior acurácia e sensibilidade nas medidas é representado pelo monitoramento automático de diversas variáveis meteorológicas em tempo real. A automatização da aquisição de dados meteorológicos tem sido utilizada amplamente pela facilidade, qualidade, eficiência, e padronização dos dados coletados, diminuindo os erros oriundos de leitura, interpretação e digitação de dados (GALVANI, 2001).

O desenvolvimento e a evolução na computação, na eletrônica e a importância de monitoramento do clima, do tempo e recursos naturais promoveram a ampliação das redes observacionais regionais e nacionais (OLIVEIRA, 2003). Mesmo assim, há ainda um número limitado de locais onde estão instaladas estações meteorológicas e/ou agrometeorológicas para monitoramento e medição de parâmetros do clima como, umidade do ar e temperatura, velocidade do vento, precipitação e radiação solar.

Além da importância na meteorologia os sistemas de aquisição automática de dados vêm ganhando espaço na área de agrárias, favorecendo o monitoramento

das variáveis relacionadas ao solo, à planta e as máquinas agrícolas que estão indiretamente ou diretamente ligadas ao crescimento e desenvolvimento da lavoura em questão, melhorando o manejo das atividades agrícolas com maior precisão (CUNHA; MARTINS, 2004).

Alguns autores afirmam, quando comparados os dados registrados nas estações meteorológicas automáticas em relação às estações convencionais tem demonstrado ajuste eficiente entre os parâmetros analisados, especialmente precipitação, umidade e temperatura do ar, considerando os diferentes tipos de abrigos, sensores e frequência de medidas, existe uma uniformidade e integridade dos dados (ALMEIDA; SOUZA; ALCÂNTARA, 2008, CUNHA; MARTINS 2004, OLIVEIRA, 2003, OLIVEIRA et al., 2010, SCARPARE et al., 2006).

A estação meteorológica automática – EMA é um equipamento que constitui em um sistema de coleta automática de informações ambientais locais (meteorológicas) e, inclui subsistemas: energia, coleta de dados, controle e armazenamento de dados, comunicação. 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. A coleta de dados é realizada por 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: umidade relativa instantânea, máxima e mínima do ar, temperatura instantânea, máxima e mínima do ar, temperatura instantânea, máxima e mínima do ponto de orvalho, velocidade instantânea do vento, direção do vento, pressão atmosférica instantânea, máxima e mínima do ar, 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 comunicação faz a transmissão dos dados coletados, que estão armazenados na memória (LACERDA, 2012).

A obtenção de dados meteorológicos com confiabilidade através do sistema automático de aquisição de dados é em função da escolha e manutenção dos sensores utilizados na estação automática. Deve-se seguir a ordem de prioridade na escolha do sensor: acurácia, custo, manutenção e consumo de energia (SENTELHAS et al., 1997). Visto que a baixa precisão pode levar a erros grosseiros na determinação da evapotranspiração de referência, a acurácia dos sensores se torna o maior limitador quanto ao objetivo da coleta e o manejo de recursos hídricos (BARROS et al., 2009).

Dados meteorológicos obtidos em estações automáticas para a estimativa da ETo, de qualidade duvidosa, 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 melhor ajustada e consistente, aumentando a eficiência no manejo da água (TURCO; BARBOSA, 2008).

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

O Brasil possui o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET com uma rede de 500 estações meteorológicas automáticas instaladas. As estações meteorológicas automáticas do INMET coletam, de minuto em minuto, as informações meteorológicas (pressão atmosférica, precipitação, temperatura, umidade, radiação solar, direção e velocidade dos ventos) representativas da área em que está localizada. A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, via satélite, para a sede do INMET em Brasília. O conjunto de dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados (INMET, 2011).

As estações meteorológicas automáticas da rede do INMET são instaladas em uma base física, numa área livre de obstruções naturais e prediais, situada em área gramada mínima de 14 m por 18 m, cercada por tela metálica. Os sensores e demais instrumentos são fixados em um mastro metálico de 10 m de altura, aterrado eletricamente e protegido por para-raios. Os instrumentos para medição de precipitação e radiação solar, bem como a antena para a comunicação de dados, ficam situados fora do mastro, mas dentro do cercado. O funcionamento de cada

sensor na EMA é monitorado pelo Centro de Controle do INMET. O Centro de Controle também monitora o fluxo de dados entre os vários computadores/servidores que interligam o Sistema de Comunicações Meteorológicas do INMET (INMET, 2011).

2.3 Hargreaves

A primeira equação de Hargreaves (1976) exige apenas dados medidos de temperatura do ar e radiação medida (DROOGERS; ALLEN, 2002), a mesma tem sido amplamente utilizada por sua simplicidade e potencial quando se tem um piranômetro e um termômetro.

Usando dados obtidos em experimentos com lisímetros, com gramado, no estado da Califórnia (clima semiárido), Hargreaves & Samani (1985) propuseram seu método para a estimativa da evapotranspiração (Pereira et al., 1997). Assim, o método de Hargreaves-Samani, originalmente, foi desenvolvido para clima semiárido, e como se baseia apenas em dados de temperatura, espera-se que esta equação superestime a ETo em climas úmidos (ADEBOYE et al., 2009; SENTELHAS et al., 2010; SUBBURAYAN et al., 2011).

A equação de Hargreaves (HARGREAVES & SAMANI, 1985) é proposta por Allen et al. (1998) como uma alternativa para estimativa de evapotranspiração de referência, com resultados razoáveis, para situações em que não se têm dados medidos de radiação solar à superfície, umidade relativa e velocidade do vento.

O método de Hargreaves-Samani não foi satisfatório para a estimativa da evapotranspiração comparado com métodos de radiação, conforme a avaliação de alguns autores (OLIVEIRA et al., 2008; TAGLIAFERRE et al., 2010; ALENCAR et al., 2011).

O método de Hargreaves (1994) apresenta resultados aceitáveis, considerando-se que utiliza apenas dados de temperaturas mínimas e máximas, e uma solução seria ajustar essa equação para as localidades estudadas, como realizado por TRAJKOVIC (2007).

Em locais de clima quente os valores do método de Hargreaves-Samani subestimam PM (SUBBURAYAN et al., 2011), já em condições de clima frio e úmido acontece a superestimação dos valores na comparação (TEMESGEN et al., 2005; TRAJKOVIC, 2007).

Gavilán et al. (2006), avaliando as relações entre EToH e EToPM para diferentes localidades do sul da Espanha, observaram uma tendência de EToH superestimar EToPM, principalmente em regiões localizadas mais distantes da costa, enquanto que o inverso ocorreu para regiões mais próximas do litoral. Segundo os autores, o aumento na amplitude térmica (AT) é um dos fatores que leva à superestimativa de EToH, em relação à EToPM.

De acordo com Allen et al. (1998), o modelo de Hargreaves pode melhorar em desempenho, com ajuste de seus coeficientes conforme as condições climáticas regionais. O ajuste de EToH pode ser realizado calibrando-se os três coeficientes empíricos do modelo, de forma isolada ou simultaneamente (GAVILÁN et al., 2006; TRAJKOVIC, 2007; GELCER et al., 2010; SENTELHAS et al., 2010; FERNANDES et al., 2012; KELSO-BUCIO et al., 2012; CONCEIÇÃO, 2013).

Dependendo do meio e do sistema de irrigação, para o manejo da irrigação são requeridos períodos de 1 a 10 dias no máximo de evapotranspiração (MACHADO; MATOS, 2000). Segundo Mendonça et al. (2003), o método de Hargreaves (1994) apresenta adequada precisão para se estimar a ETO na região Norte Fluminense – RJ, sobretudo para períodos superiores a sete e dez dias. Aliado a isso, Gelcer et al. (2010) observaram que o desempenho da equação de Hargreaves ajustada melhora, quando aumenta o intervalo de tempo de avaliação.

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

França Neto et al. (2011), experimento com café arábica, concluíram que o método de Hargreaves quando ajustado localmente proporcionou melhoria significativa da estimativa da ETo, podendo manejar a irrigação com o método de Hargreaves com o ajuste dos parâmetros da equação de regressão linear.

Os métodos de Hargreaves devem ser comparados ao de PM-FAO e talvez

calibrados para locais específicos, de modo a fornecerem resultados mais confiáveis (MOHAWESH, 2010).

2.4 Análise das equações de Hargreaves

Antes de aplicar um método de evapotranspiração de referência para determinado local, é necessário verificar o desempenho deste método e, quando necessário, fazer calibrações para minimizar os erros de estimativa de evapotranspiração. A escolha das estimativas da evapotranspiração varia conforme a sua aplicação e as necessidades de precisão e duração dos períodos de cálculo.

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.

Em seus estudos, Faria et al. (2000), compararam a E_{To} 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, R^2 inferior a 50%.

Adotar o coeficiente de determinação (R^2) como o único critério de definição da qualidade de métodos não é adequado, uma vez que este método não estabelece a magnitude e o tipo das diferenças entre um valor padrão e um valor previsto por modelos de estimativa (BARROS et al. 2009). Assim, a análise dos índices de concordância de Wilmott (d), erro absoluto médio (EAM), e raiz do erro quadrático médio (ERQM) auxiliam a interpretação dos resultados.

De acordo com Santos (2011), o coeficiente de eficiência (E) representa a razão entre o erro quadrado médio da estimativa e a variância dos dados observados, subtraída da unidade; esse coeficiente varia de $-\infty$ a 1. Valores de E iguais a zero indicam que a média dos dados observados é uma estimativa tão boa quanto os valores preditos pelo modelo; quando $E \leq 0$, a média dos valores observados é uma estimativa melhor do que os valores estimados pelo modelo. Este

índice, assim, apresenta uma superioridade em relação ao índice de Willmott em termos de interpretação.

Conceição (2013) cita os ajustes dos coeficientes HC (0,0023), HE (0,5) e HT (17,8) foram realizados com base nos dados diários de EToH e EToPM referentes aos anos de 2004, 2006, 2008 e 2010 ($n = 1446$), empregando-se a ferramenta Solver, do programa Microsoft Excel[®] (BORGES JÚNIOR et al., 2012). As avaliações do desempenho dos valores originais e ajustados de EToH, em relação aos valores de EToPM, foram obtidas considerando-se os dados diários relativos aos anos ímpares da série (2005, 2007, 2009 e 2011; $n = 1435$) e os valores de R^2 , d e c .

Arraes et al. (2016) usaram médias mensais de ETo para calcular as metodologias, PM e HS, para todos os locais estudados. Com os meses ímpares obtiveram parâmetros empíricos (HC e HE) e com médias mensais de ETo dos meses pares fez-se a validação do modelo já calibrado pelos parâmetros (HC e HE) previamente calculados.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo e dados meteorológicos

A área de estudo (Figura 1) está localizada na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba no estado de Minas Gerais, predominantemente no Bioma Cerrado, composta por serras distribuídas paralelamente aos rios Paranaíba e Grande.

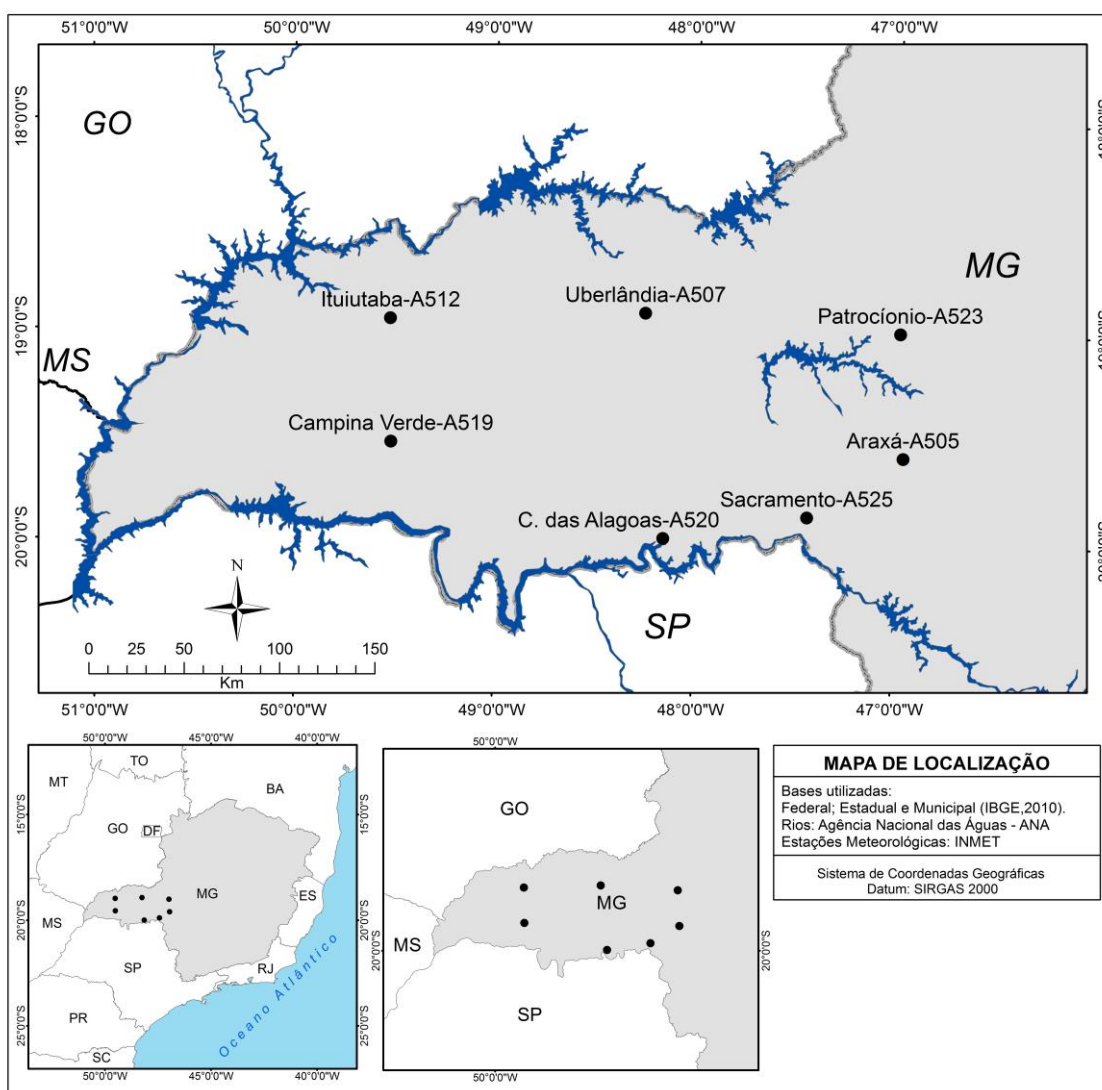


Figura 1. Mapa com a localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas no estudo.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é predominante Aw, tropical úmido de savana com a época seca coincidindo com o inverno, vegetação arbustiva e rasteira.

Os dados foram obtidos de sete (07) estações meteorológicas automáticas (modelo MAWS301, Vaisala) do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, situadas na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba - MG, Tabela 1, Figura 1.

Tabela 1. Tabela informativa da localização das estações automáticas utilizadas.

	Estação Automática	Instalada Data	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	Araxá-A505	19/12/2002	19°36'20" S	46°56'58" W	1018
2	Sacramento-A525	18/08/2006	19°52'30" S	47°26'02" W	913
3	Conceição das Alagoas-A520	16/07/2006	19°59'09" S	48°09'05" W	573
4	Campina Verde-A519	14/07/2006	19°32'21" S	49°31'05" W	559
5	Ituiutaba-A512	11/05/2006	18°57'10" S	49°31'30" W	540
6	Uberlândia-A507	14/12/2002	18°55'01" S	48°15'20" W	875
7	Patrocínio-A523	22/08/2006	18°59'48" S	46°59'09" W	978

Para este estudo, os dados obtidos foram a temperatura, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a radiação solar global. A temperatura do ar foi medida com termômetro (modelo HMP45A, Vaisala), com acurácia de $\pm 0,2$ °C e a umidade relativa do ar mensurada com higrômetro (modelo HMP45D, Vaisala), acurácia de $\pm 1\%$, utilizando-se termohigrômetro marca Vaisala. A velocidade do vento foi obtida por meio de anemômetro instalado a 10 m da superfície do solo (modelo WAA151, Vaisala), com limite de funcionamento entre 0,4 a 75 m s⁻¹ e acurácia de $\pm 0,17$ m s⁻¹, calculada para altura de 2 m, conforme recomendado a FAO-56, para estudos agrometeorológicos. A radiação solar global foi obtida com piranômetro (modelo CMP6, Vaisala) com acurácia ± 20 W m⁻² e constante de calibração de $12,80 \cdot 10^{-6}$ V W⁻¹ m⁻².



Figura 2. Estação Meteorológica Automática – EMA. Ao centro a antena de comunicação via satélite, à direita o “datalogger” com sensor de temperatura presos ao mastro e à esquerda o pluviômetro.

Os dados foram obtidos dos registros horários, referentes ao período de 1^o de janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2015.

3.2 Integridade dos dados

A integridade dos dados das estações meteorológicas automáticas utilizadas foi avaliada pelas técnicas descritas por Allen (1996). Segundo o autor, os registros produzidos por estações meteorológicas podem ser comparados à registros de estações vizinhas para verificar se houve mudança no funcionamento do equipamento e/ou por problemas de calibração dos instrumentos que ocorreram devido ao tempo. Assim, os dados foram comparados ao dos postos meteorológicos presentes da mesorregião, que são situados nas cidades de Araxá, Uberaba,

Capinópolis e Patos de Minas. A comparação foi realizada entre cada estação e o posto meteorológico mais próximo. A Figura 3 demonstra as distâncias entre os comparados.

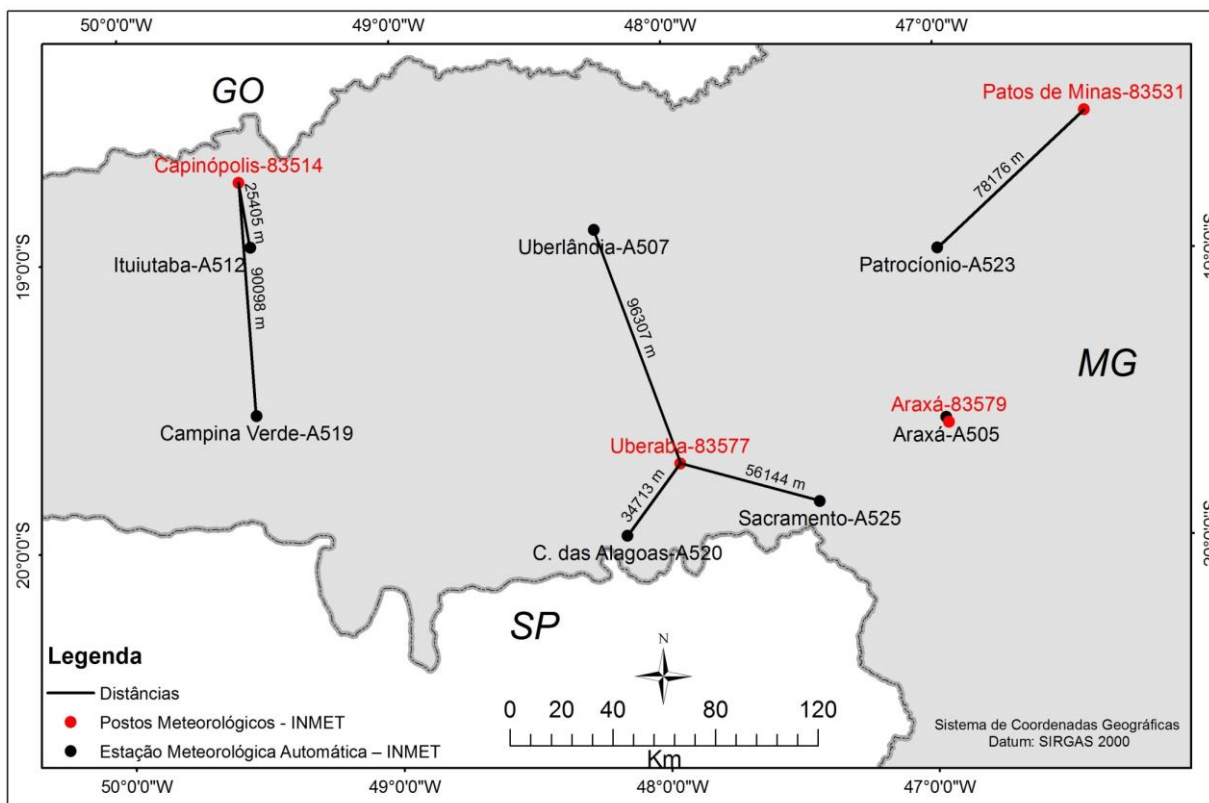


Figura 3. Localização e respectivas distâncias entre as estações meteorológicas automáticas e o posto meteorológico mais próximo da estação, na área de estudo.

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:

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

Em que,

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:

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

Em que,

E - Constante calcula utilizando a função de extinção da radiação de Beer;

H - altitude da estação (m).

O cálculo da constante E é descrito por Allen (1996).

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:

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

Em que,

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 θ - o ângulo de elevação do sol 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.

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

Em que,

P - pressão atmosférica (kPa);

W - água precipitável na atmosfera, em cm.

W pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

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

Em que,

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:

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

Em que,

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

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

Em que,

ωs - ângulo do horário do pôr-do-sol.

Uma simplificação da equação (9) determinada por regressão é

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

Em que,

J - dia do ano (1 a 365);

φ - latitude em graus radianos.

A equação (10) estima $(\sin \Phi)_{24}$ com um erro de estimativa de aproximadamente 4% para períodos da primavera, verão e outono, para uma faixa de -65° a 65° latitude e 6% para todos os meses sobre uma faixa de -60° a 60° latitude. Essa qualidade 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 dupla massa, 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 Evapotranspiração de referência

A ETo foi estimada em escala média diária, para os anos de 2009 a 2015, pelas equações de Hargreaves (1976), Hargreaves e Samani (1985), Hargreaves (1994) e Penman-Monteith FAO56 (ALLEN et al., 1998), considerando esse último como padrão para a comparação dos demais métodos.

3.3.1 Equação de Hargreaves (1976)

$$\text{Seja, } E_{ToH} = 0,0075 Q T \quad (11)$$

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

E_{ToH} - evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia⁻¹;

T - temperatura média do ar, °F;

Q - radiação solar medida, cal cm⁻² dia⁻¹.

Pode-se escrever a eq. (11) na seguinte forma:

$$E_{ToH} = 0,0075 \frac{Q}{59} T \quad (12)$$

Em que

Q - radiação solar global recebida, cal cm⁻² dia⁻¹;

1/59 - fator de conversão de cal cm⁻² a mm de evaporação equivalente.

3.3.2 Equação de Hargreaves e Samani (1985)

$$\text{Considerando, } E_{ToHS} = 0,0023Q_o (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{HE} (T + 17,8) \quad (13)$$

Em que,

E_{ToHS} - evapotranspiração de referência, grama, mm d⁻¹;

$T_{\text{máx}}$ - temperatura máxima, °C;

$T_{\text{mín}}$ - temperatura mínima, °C;

T - temperatura média diária, °C;

Q_o - radiação solar extraterrestre (mm dia⁻¹);

HE - expoente empírico (0,5).

Os valores diários da radiação solar extraterrestre foram obtidos em função da latitude local, a partir dos dados interpolados de Napier Shaw, citado por Ramos et al. (1989), tendo como parâmetro máximo da atmosfera, o 15º dia de cada mês entre as latitudes 10ºN e 40ºS.

3.3.3 Equação de Hargreaves (1994)

$$\text{Considerando, } E_{ToHG} = 0,0023 \text{ RA } (T^{\circ}\text{C} + 17,8) \text{ TD}^{HE} \quad (14)$$

Em que,

E_{ToHG} - evapotranspiração de referência, em gramado, mm dia^{-1} ;

RA - radiação solar extraterrestre (mm dia^{-1});

$T^{\circ}\text{C}$ - $(T_{\text{max}} + T_{\text{min}})/2$ (temperatura máxima diária do ar mais a temperatura mínima diária do ar, em $^{\circ}\text{C}$, dividido por dois);

TD - $T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ (temperatura máxima diária do ar menos a temperatura mínima diária do ar, em $^{\circ}\text{C}$);

HE - expoente empírico (0,5).

Os valores diários da radiação solar extraterrestre também foram obtidos em função da latitude local, a partir dos dados interpolados de Napier Shaw, citado por Ramos et al. (1989), tendo como parâmetro máximo da atmosfera, o 15º dia de cada mês entre as latitudes 10ºN e 40ºS.

3.3.4 Equação do Penman-Monteith (PM)

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

$$E_{ToPM} = \frac{0,409 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) v (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34v)} \quad (15)$$

Em que

E_{To_PM} - evapotranspiração de referência, em gramado, mm d^{-1} ;

R_n - radiação líquida, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;

G - fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;

T - temperatura média do ar, $^{\circ}\text{C}$;

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.

Por ser assumidos períodos diários o valor do fluxo de calor no solo (G) foi considerado igual a zero (ALLEN et al., 1998; BACK, 2008).

3.4 Ajuste do Expoente Empírico de Hargreaves (HE)

Foi realizada a calibração local (município da estação) das equações de Hargreaves (EToHSL e EToHGL) e a regional (EToHSR e EToHGR) para mesorregião por meio do ajuste do expoente empírico HE das equações. Para a calibração das equações, foi utilizada a metodologia empregada por Trajkovic (2007) e descrita por Wraith & Or (1998), utilizando os dados meteorológicos dos anos ímpares da série (2009, 2011, 2013 e 2015). Para validação da equação foram empregados os dados meteorológicos dos anos pares da série (2010, 2012, 2014). Esta metodologia reduz o efeito bias, que pode ocorrer de um ano para o outro ano sequencial.

O ajuste do parâmetro da equação de Hargreaves e Samani (1985) e Hargreaves (1994) foi realizado a partir do Microsoft Excel® utilizando a metodologia descrita por Wraith e Or (1998) para ajuste de equação não linear usando o aplicativo Solver. Essa técnica utiliza como parâmetro de otimização a minimização da soma do desvio ao quadrado (equação 16), ou seja, a diferença entre os valores obtidos por PM e por HG em uma calibração perfeita será próxima a zero.

$$\sum_{i=1}^n (PM_i - HG_i)^2 = 0 \quad (16)$$

Em que:

PM_i - evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith (mm dia⁻¹) para um respectivo dia de um determinado ano (i);

HGi - evapotranspiração de referência estimada pelo método de local ou regional (mm dia^{-1}) para um respectivo dia de um determinado ano;

N - número total de dias.

3.5 Avaliação dos dados

Para a análise dos dados médios diários da ETo, antes e após a calibração, os métodos avaliados foram classificados em relação aos seus respectivos desempenhos, a partir do desvio médio absoluto (DMA, eq. 17), desvio médio relativo (DMR, eq. 18), índice de concordância ou índice de Willmott (d, eq. 19), coeficiente de confiança (c, eq. 20), coeficiente de correlação (r) e de determinação (R^2), adotados por Souza (2011).

Descritos assim:

$$DMA = \sqrt{\frac{\sum(Pi - Oi)^2}{N}} \quad (17)$$

$$DMR = \sqrt{\frac{\sum \frac{(Pi - Oi)^2}{Oi}}{N}} \times 100 \quad (18)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(Pi - Oi)^2}{\sum(|Pi - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \right] \quad (19)$$

$$c = rxd \quad (20)$$

Em que,

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

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

N - número de estimativas.

O índice de concordância ou índice de Willmott condensa todas as diferenças entre as estimativas do modelo e as observações em uma estatística quantitativa, sendo que, visto de outra perspectiva, o índice de concordância é uma medida de quão bem o modelo estima o afastamento dos dados da média observada

(ALENCAR, 2011).

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

Tabela 2. 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

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

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 3. 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

Fonte: Silva e Barros Filho (2003).

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.

3.6 Desempenho das equações de Hargreaves e Samani (1985) e Hargreaves (1994)

Para quantificar o desempenho das equações EToHS e EToHG, ajustadas para o processo local (município da estação) e regional (Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba), utilizaram-se os seguintes critérios estatísticos, o coeficiente de determinação (R^2), o erro relativo do quadrado médio (ERQM, eq. 21), o erro médio

absoluto (EMA, eq. 22) e a eficiência do modelo (EF, eq. 23).

$$ERQM = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (ETo_{PMi} - ETo_{HG_i})^2}{N-1} \right]^{0,5}}{\overline{M}} * 100 \quad (21)$$

Em que:

ERQM - erro relativo do quadrado médio (%);

ETo_{PMi} - evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith (mm dia^{-1}) para um respectivo dia de um determinado ano (i);

ETo_{HG_i} - evapotranspiração de referência estimada pelo método de local ou regional (mm dia^{-1}) para um respectivo dia de um determinado ano;

N - número total de dias;

M - média dos valores de ETo estimados pela equação de EToPM.

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ETo_{PMi} - ETo_{HG_i}| \quad (22)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_i (ETo_{PMi} - ETo_{HG_i})^2}{\sum_i (ETo_{PMi} - \overline{ETo_{PMi}})^2} \quad (23)$$

Em que:

EF - eficiência do modelo;

EMA - erro médio absoluto (mm dia^{-1});

$\overline{ETo_{PMi}}$ - média dos valores diários estimados pela equação de EToPM (mm dia^{-1}).

Um modelo perfeito deve ter a EF igual a 1. Um valor igual a 0 significa que o modelo não prediz melhor que a média aritmética dos valores observados, ou seja, o modelo não serve para explicar a variabilidade nos valores observados.

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 das estações meteorológicas automáticas do INMET localizadas na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba foi considerada aceitável, adotando os procedimentos descritos em Allen (1996).

Foram avaliados, anualmente, os dados meteorológicos de cada estação automática, relacionando com o posto meteorológico mais próximo. As figuras de número 4 a 9, apresentam a avaliação da estação meteorológica automática de Uberlândia em relação ao posto meteorológico de Uberaba.

A radiação solar medida, Figura 4, pela estação meteorológica 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). Para o mesmo ano e os outros anos estudados foram obtidos resultados semelhantes para as estações meteorológicas estudadas.

Os registros de velocidade do vento da estação meteorológica de Uberlândia e do posto meteorológico de Uberaba, foram comparados na forma acumulativa (acumulando a velocidade do vento diariamente) segundo a técnica da análise de dupla massa (Figura 5). Os resultados mostram que os anemômetros estão adequados, pois a inclinação de tendência entre as duas acumulações não mudou ao longo do tempo. A diferença dos valores obtidos na forma acumulativa dos anemômetros é devido ao relevo e a distância dos anemômetros, mostrando que o parâmetro de velocidade do vento não é exatamente avaliado nessas condições. Para o mesmo ano e os outros anos estudados foram obtidos resultados semelhantes para as estações meteorológicas estudadas.

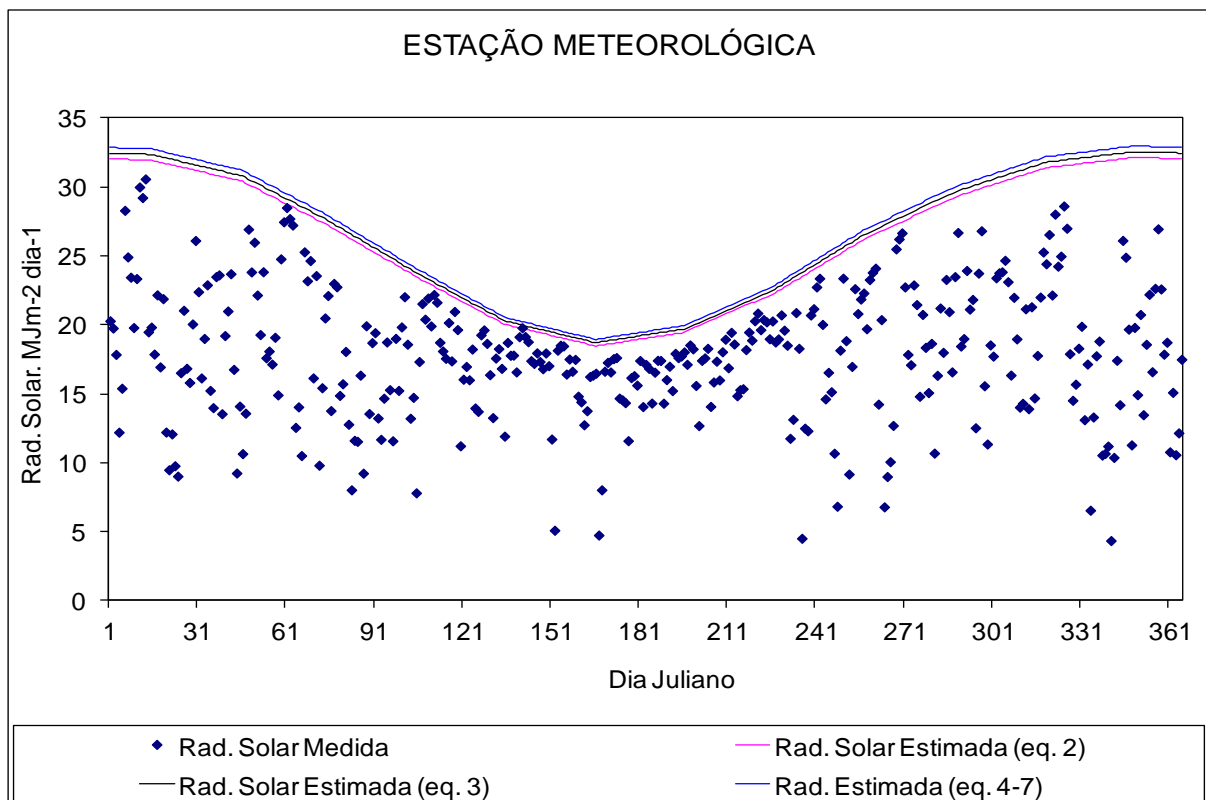


Figura 4. Radiação solar medida pela estação meteorológica automática de Uberlândia em 2009 e Radiação Solar estimada por três equações das técnicas descritas por Allen (1996).

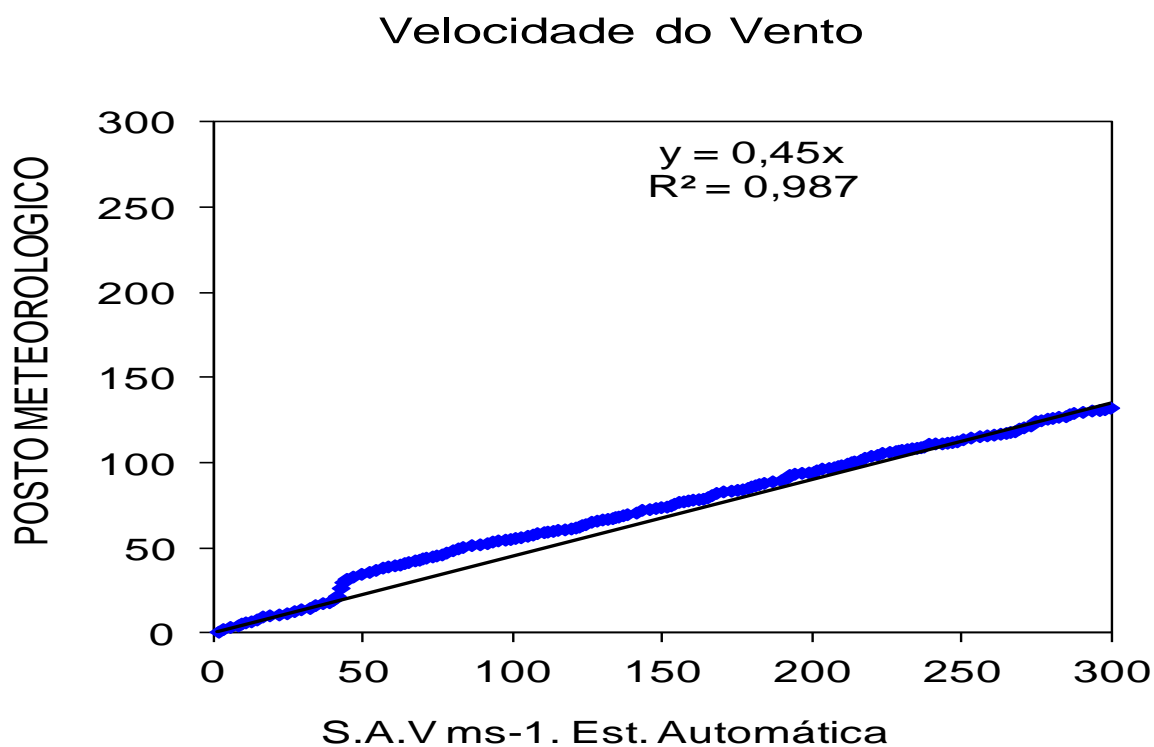


Figura 5. Soma acumulativa da Velocidade do Vento da estação meteorológica automática de Uberlândia e o posto meteorológico de Uberaba, em 2009.

Valores de umidade relativa da estação meteorológica automática de Uberlândia acompanharam a do posto meteorológico de Uberaba (figura 6 e 7) indicaram adequada calibração do sensor de UR; bom funcionamento. O local de medida das estações apresentou aridez devido UR máxima ser abaixo de 80 a 90% em alguns dias do ano de 2009, repetindo nas outras estações e nos outros anos, segundo pesquisas de Turco e Barbosa (2008) e Oliveira (2014).

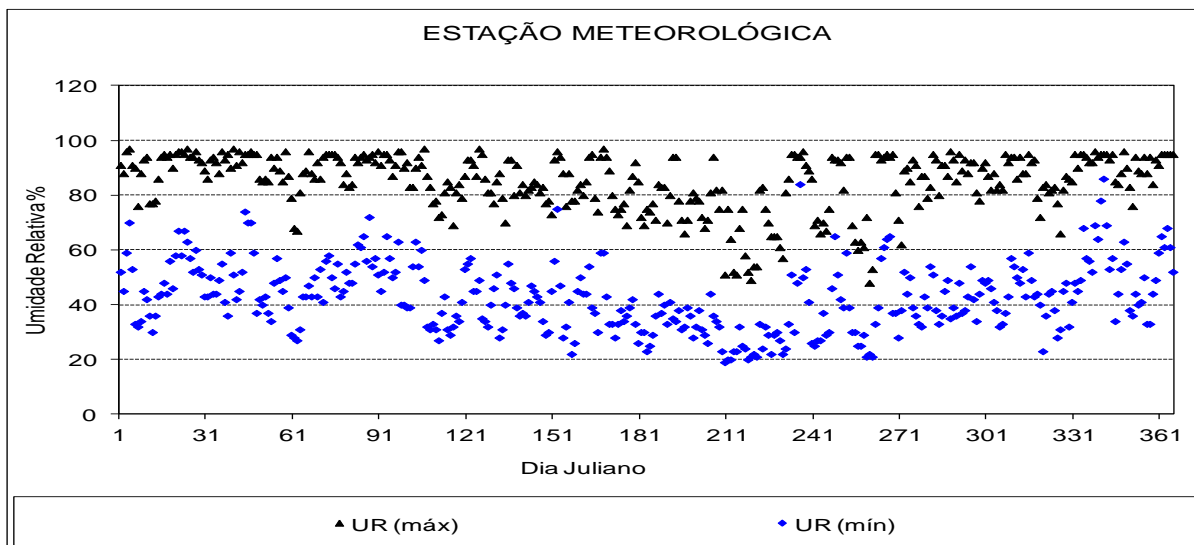


Figura 6. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica automática de Uberlândia, em 2009.

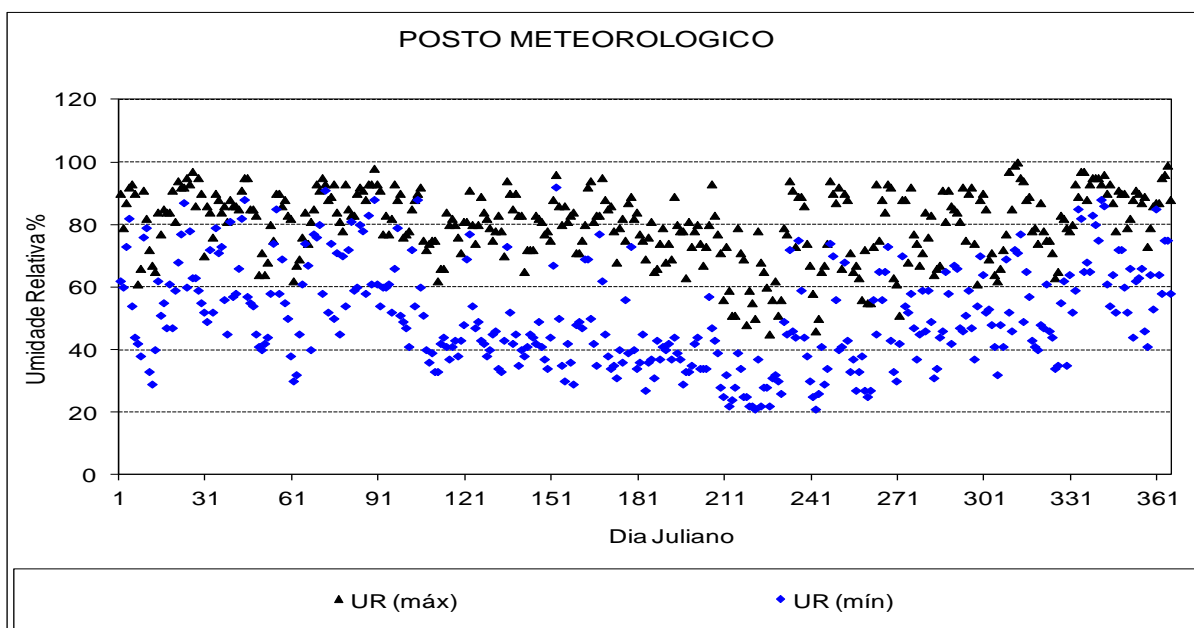


Figura 7. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima do posto meteorológico de Uberaba, em 2009.

Para as temperaturas mínima e máxima a inclinação da reta apresentada nos gráficos (figuras 8 e 9) de praticamente 1/1 (um para um) indica uma boa qualidade dos dados, segundo Oliveira (2014). Para o mesmo ano e os outros anos estudados foram obtidos resultados semelhantes para as estações meteorológicas estudadas.

Temperatura Mínima

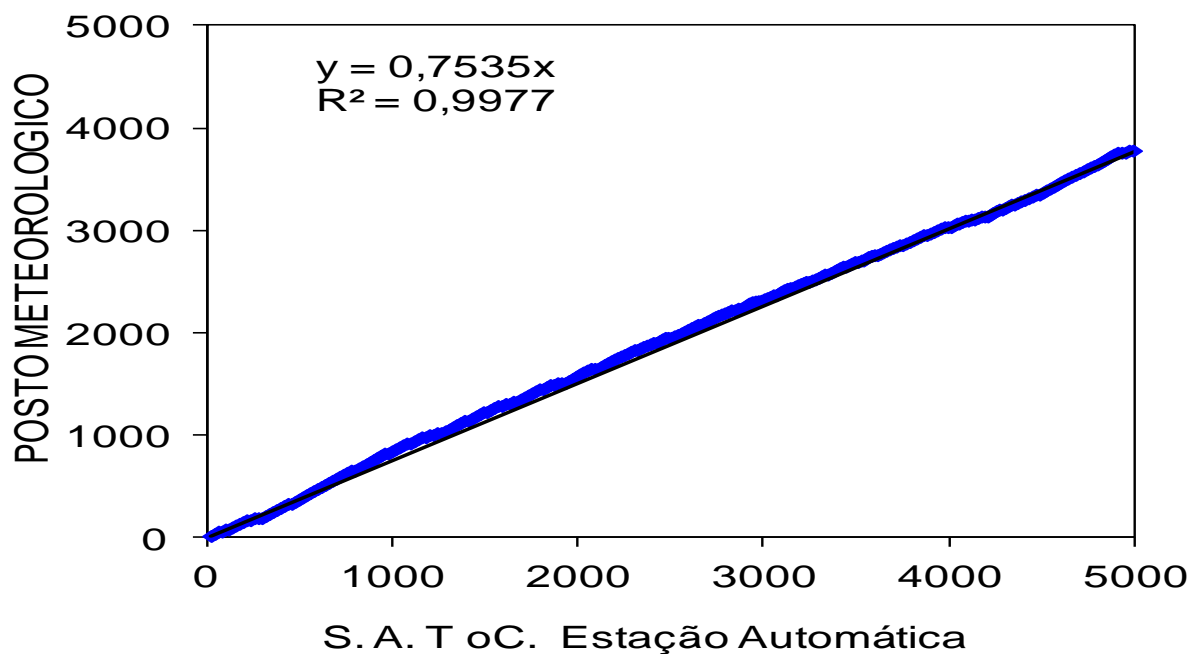


Figura 8. Soma acumulativa da Temperatura Mínima da estação meteorológica automática de Uberlândia e do posto meteorológico de Uberaba, ano 2009.

Temperatura Máxima

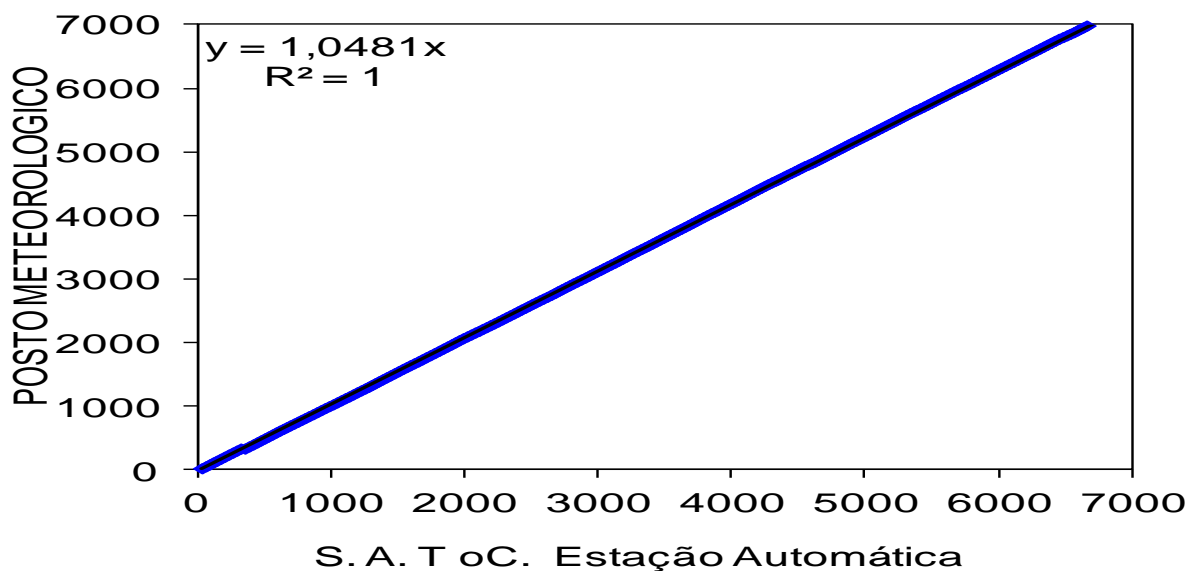


Figura 9. Soma acumulativa da Temperatura Mínima da estação meteorológica automática de Uberlândia e do posto meteorológico de Uberaba, ano 2009.

4.2 Avaliação da Equação Hargreaves (1976)

A Tabela 4 mostra que, os valores obtidos da análise do método de Hargreaves (1976) apresentaram bons resultados para a região e para os locais de estudo, por apresentarem os coeficientes maiores que 0,88. Concordando com o trabalho de Silva et al. (2014), que o método se mostrou mais confiável e coerente, e também com Lacerda & Turco (2015), que verificaram os melhores ajustes na estimativa para a evapotranspiração diária, comparando ao Penman-Monteith.

Tabela 4. Valores do coeficiente de correlação (r), de concordância (d), de confiança (índice c), de determinação (R^2) e equação ($y=ax$) para o método de Hargreaves (1976).

Hargreaves 1976	Equação	R^2	d	r	Índice C	Classificação
Araxá	$y=0,9277x$	0,97	0,98	0,98	0,960	Ótimo
Campina Verde	$y=0,8848x$	0,97	0,95	0,98	0,940	Ótimo
Conceição das Alagoas	$y=0,9363x$	0,94	0,97	0,97	0,938	Ótimo
Ituiutaba	$y=0,881x$	0,97	0,94	0,98	0,929	Ótimo
Patrocínio	$y=0,8915x$	0,99	0,96	0,99	0,952	Ótimo
Sacramento	$y=0,9182x$	0,97	0,97	0,98	0,960	Ótimo
Uberlândia	$y=0,9115x$	0,97	0,97	0,98	0,953	Ótimo
Regional	$y=0,9065x$	0,95	0,91	0,98	0,887	Ótimo

Os valores do coeficiente angular (a) na equação ($y=ax$) de ajuste da análise de regressão, superiores a 0,88 e mais próximos da unidade, indicam concordância entre os valores estimados por esse método e o estimado pelo método-padrão PM, sendo oposto ao de Lacerda & Turco (2015) que encontrou valor acima de 1,11 para mesma região.

O método de Hargreaves (1976) apresentou o coeficiente de determinação acima de 0,94, mostrando-se adequado para a região, mas a sua necessidade de medição da radiação solar global dificulta a utilização de tal método pelo produtor. Indicando que, desde que se tenha piranômetro (acurácia $\pm 20 \text{ W m}^{-2}$ e constante de calibração de $12,80 \cdot 10^{-6} \text{ V W}^{-1} \text{ m}^{-2}$) e termômetro (com acurácia de $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$), o método pode substituir o PM com considerável precisão.

Os valores de R^2 maiores que 0,94 indicam que o método apresentou precisão similar nos locais e regionalmente, quando comparados com o método PM. Mas ao adotar o coeficiente de determinação R^2 , como único critério de definição da qualidade de método para a região, não é adequado, uma vez que esse índice não estabelece o tipo e a magnitude das diferenças entre o valor estimado pelo método-padrão e o valor previsto por modelos de estimativa (BARROS et al., 2009).

Observa-se com o índice de concordância “d” de Willmott, que o método de Hargreaves (1976) apresenta valores que mais se aproximam de uma concordância perfeita, próximos de 1, entre 0,91 para avaliação regional e 0,98 para Araxá.

Para o coeficiente de confiança (índice c), o método de Hargreaves (1976) apresentou-se “Ótima” classificação em todas as localidades e também de forma regional, diferente da classificada “Boa” obtida por Silva et al. (2014), utilizando também o PM como padrão. Camargo & Sentelhas (1997), quando utilizaram como referência os lisímetros para o estado de São Paulo, encontraram a classificação “Ruim”, pressupõe-se dessa forma que os piranômetros e termômetros evoluíram em acurácia e precisão.

Os coeficientes de correlação apresentaram correlação muito forte positivamente na região e nos locais, sendo acima de 0,97 com o método Penman-Monteith FAO56, conforme a classificação de Camargo & Sentelhas (1997). Esses resultados do método superam os dados obtidos por Silva et al. (2014), para a região de Fernando de Noronha, que foi de 0,78. Confrontando os valores do presente trabalho aos valores de Silva et al. (2003), em estudo de comparação de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração em Petrolina-PE (em relação ao lisímetro de pesagem), pode-se observar que os coeficientes do método se apresentaram melhores no atual estudo.

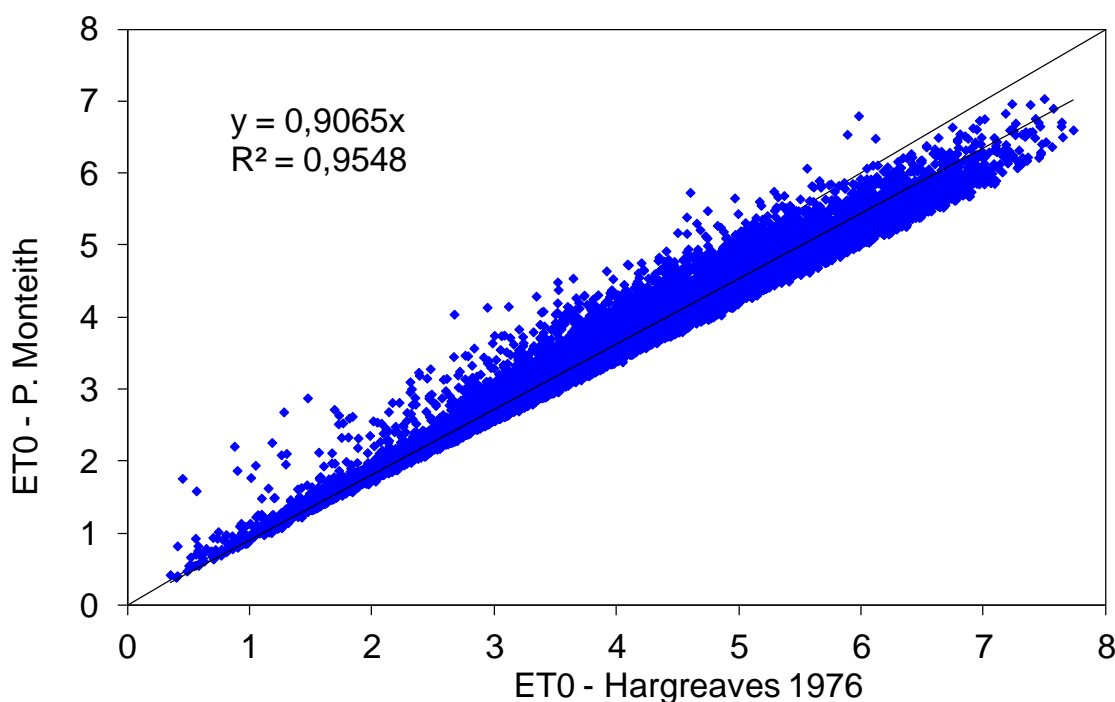


Figura 10. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Hargreaves (1976), em relação ao Penman-Monteith, para a região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro.

A análise de regressão no modelo linear sem intercepto da ETo, determinada pelo método Hargreaves (1976), figura 10, em comparação com o método PM, apresentou valores que superestimaram os valores médios diários da ETo, sendo oposto ao encontrado por Lacerda & Turco (2015), que avaliaram o mesmo método para o município de Uberlândia em 2010. A superestimação de Hargreaves 1976 em relação a PM deve ser devido a interferência dos parâmetros de umidade e vento na evapotranspiração de referência de toda a região.

4.3 Avaliação da Equação de Hargreaves e Samani (1985)

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos da análise do método de Hargreaves e Samani (1985) antes e após a calibração do HE, mostra que o método é adequado para a região, mas com a calibração houve uma melhora considerável dos coeficientes avaliados porque os valores aumentaram, aproximando mais de 1.

Tabela 5. Valores do expoente empírico (HE), do coeficiente de determinação (R^2), de correlação (r), de concordância (d) e de confiança (índice c) para o método de Hargreaves e Samani (1985), antes e após a calibração do HE.

Hargreaves e Samani (1985)	HE	R^2	r	d	Índice C	Classificação
Araxá	0,5	0,67	0,82	0,90	0,741	Bom
Araxá*	0,4998	0,70	0,84	0,91	0,762	Muito bom
Campina Verde	0,5	0,78	0,89	0,89	0,790	Muito bom
Campina Verde*	0,4589	0,76	0,87	0,93	0,809	Muito bom
Conceição das Alagoas	0,5	0,78	0,88	0,89	0,793	Muito bom
Conceição das Alagoas*	0,4582	0,82	0,90	0,94	0,853	Ótimo
Ituiutaba	0,5	0,81	0,90	0,86	0,777	Muito bom
Ituiutaba*	0,4452	0,77	0,88	0,93	0,822	Muito bom
Patrocínio	0,5	0,80	0,89	0,89	0,794	Muito bom
Patrocínio*	0,4579	0,77	0,88	0,94	0,823	Muito bom
Sacramento	0,5	0,71	0,84	0,91	0,771	Muito bom
Sacramento*	0,4864	0,72	0,85	0,92	0,781	Muito bom
Uberlândia	0,5	0,64	0,80	0,89	0,714	Bom
Uberlândia*	0,4918	0,65	0,81	0,89	0,722	Bom
Regional	0,5	0,70	0,84	0,89	0,749	Bom
Regional*	0,4712	0,70	0,84	0,92	0,774	Muito bom

*HE calibrado.

Os valores do expoente empírico HE, para localidades, variaram de 0,4452 (Ituiutaba) a 0,4998 (Araxá). O valor regional do HE encontrado foi de 0,4712. Assim,

os expoentes obtidos nas calibrações não foram superiores ao proposto na equação original, que é de 0,5.

Os coeficientes de correlação “r” apresentaram uma correlação muito forte, positivamente, em todas as situações para o método de Hargreaves (1985), sendo acima de 0,80, com o método Penman-Monteith FAO56. Concordando com Melo & Fernandes (2012) que encontram o coeficiente de correlação “r” de 0,88 para Uberaba e também com Silva et al. (2011) que observaram 0,83 para Uberlândia em 2004. Dessa forma, os valores encontrados na região são superiores aos observados por Noia et al. (2014), nos seguintes períodos, diário 0,77, decenal 0,80 e mensal 0,84, para Dourados-MS.

O índice de concordância “d” de Willmott, que varia de 0 a 1, representa o quanto os valores estimados se ajustam aos valores medidos, ou seja, é uma medida de quão bem o modelo estima o afastamento dos dados da média observada (WILLMOTT, 1985). O índice de concordância menor foi de 0,86 (Ituiutaba, HE 0,5), no entanto superior ao encontrado por Alencar et al.(2011) de 0,82 e Silva et al. (2011) de 0,84, na mesma região. O índice de concordância maior foi 0,94 (Conceição das Alagoas, HE 0,4582). Com os resultados obtidos, percebe-se que com a calibração, os valores de coeficiente de concordância foram maiores em relação à equação original, aumentando a aproximação de uma concordância perfeita.

Para o coeficiente de confiança “c” na Tabela 5, o local de menor desempenho foi Uberlândia (HE 0,5) com 0,714, considerado bom, e o de melhor desempenho foi Conceição das Alagoas (HE 0,4583) com 0,853, apresentando ótimo desempenho. O índice “c” regional com a calibração evoluiu de bom (0,749) para muito bom (0,774). Considerando o aumento dos valores obtidos no coeficiente de confiança, com o ajuste do expoente empírico, justifica a calibração do método.

As correlações “R²” obtidas entre os modelos Hargreaves (1985) e PM não foram afetadas diretamente pela calibração do método, por apresentar menores valores na localidade de Uberlândia com 0,64 e 0,65, maiores para Conceição das Alagoas com 0,82 e 0,78, e regionalmente manteve em 0,7 antes e após a calibração. Valores maiores foram encontrados por Carvalho et al.(2015) para Campina Verde (0,86) e para Uberaba (0,89). Isto ocorreu provavelmente devido o

modelo ter sido desenvolvido em condições de clima árido (HARGREAVES & SAMANI, 1985).

Visualiza-se, na Figura 11 a análise de regressão linear ($y = a x + b$) entre o Hargreaves e Samani (1985) e o PM antes e após a calibração para a região, com suas respectivas equações de ajuste e coeficiente de determinação (R^2). O método de Hargreaves (1985) superestima o padrão. No estado do Ceará, Lima Junior et al. (2016) comprovou que Hargreaves (1985) independente de calibrado ou não, se apresenta superestimado em relação ao PM. A superestimação conduz ao aumento na lâmina de água a ser aplicada e como consequência interfere na umidade ideal do solo para a absorção adequada pela planta de solução presente no solo.

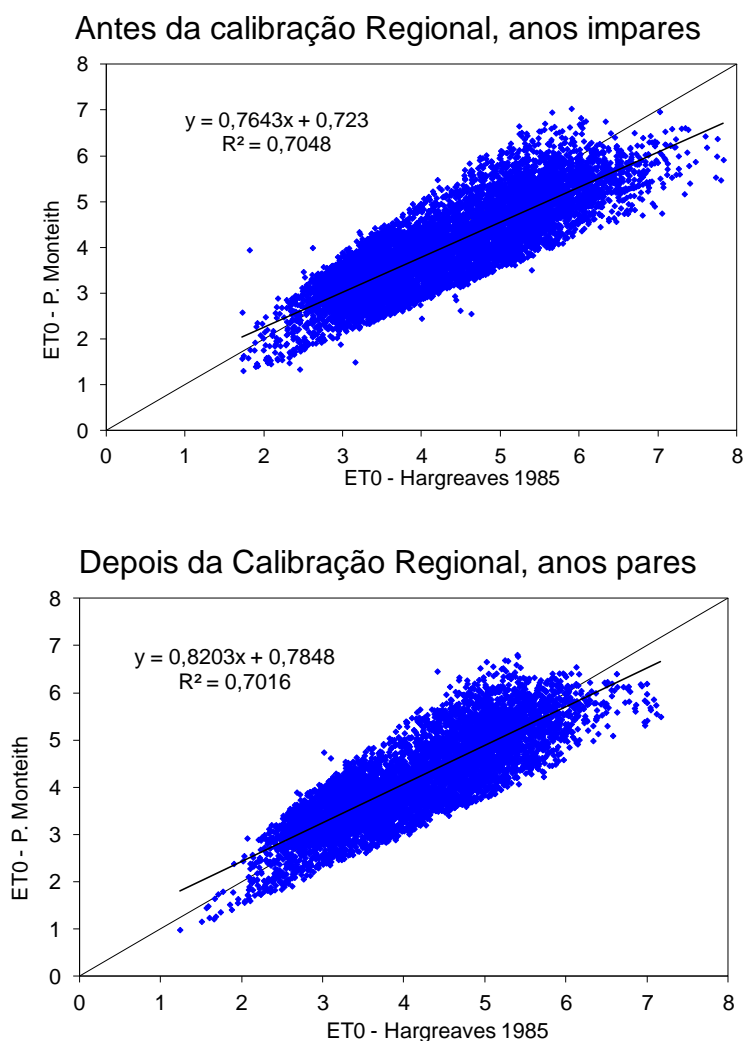


Figura 11. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Hargreaves (1985), em relação ao Penman-Monteith, para a região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro.

4.4 Avaliação da Equação de Hargreaves (1994)

Os valores obtidos da análise do método de Hargreaves (1994) antes e após a calibração do HE são apresentados na Tabela 6, indicando que o método é adequado para os locais e para a região. Com a calibração houve uma melhora nos coeficientes.

Tabela 6. Valores do expoente empírico (HE), do coeficiente de correlação (r), de concordância (d), de confiança (índice c) e de determinação (R^2) para o método de Hargreaves (1994) antes e após a calibração do HE.

Hargreaves 1994	HE	R^2	r	d	Índice C	Classificação
Araxá	0,5	0,65	0,80	0,89	0,719	Bom
Araxá*	0,4907	0,67	0,82	0,90	0,737	Bom
Campina Verde	0,5	0,76	0,87	0,87	0,758	Bom
Campina Verde*	0,4503	0,74	0,86	0,92	0,790	Muito bom
Conceição das Alagoas	0,5	0,77	0,88	0,88	0,770	Muito bom
Conceição das Alagoas*	0,4505	0,80	0,89	0,94	0,838	Muito bom
Ituiutaba	0,5	0,80	0,89	0,83	0,747	Bom
Ituiutaba*	0,4382	0,76	0,87	0,93	0,808	Muito bom
Patrocínio	0,5	0,78	0,89	0,86	0,765	Muito bom
Patrocínio*	0,4259	0,75	0,87	0,90	0,784	Muito bom
Sacramento	0,5	0,70	0,83	0,90	0,752	Bom
Sacramento*	0,4773	0,70	0,84	0,91	0,765	Muito bom
Uberlândia	0,5	0,61	0,78	0,88	0,691	Bom
Uberlândia*	0,4854	0,63	0,79	0,88	0,699	Bom
Regional	0,5	0,69	0,83	0,87	0,724	Bom
Regional*	0,4598	0,68	0,83	0,91	0,756	Bom

*HE calibrado.

O valor do expoente empírico HE, para região foi de 0,4598 e para localidades apresentaram entre 0,4259 (Patrocínio) e 0,4907 (Araxá), mantendo-se

abaixo do original e diferente de 0,5. Coincidindo com Kelso-Bucio et al. (2012) quando calibrou para 32 estações no México, com Trajkovi (2007) no Sudeste da Europa e com Conceição (2013) no Noroeste Paulista. Mas Fernandes et al. (2012) averiguou valores de expoentes maiores que 0,59 para o estado de Goiás.

A correlação (r) entre o método de Hargreaves (1994) e o de PM apresentou-se muito forte positivamente com valores acima de 0,78. Coincidindo com Conceição (2013) que encontrou valores acima de 0,88 antes e após a calibração.

O índice de concordância alternou de 0,83 (Ituiutaba, HE 0,5) a 0,94 (Conceição das Alagoas, HE 0,4505), próximos aos valores de Conceição (2013) de 0,76 a 0,95. Houve um aumento de valores após calibração na região, podendo-se perceber seus efeitos para uma concordância perfeita. Coincidentemente o índice de concordância repetiu-se baixo em Ituiutaba e em alto Conceição das Alagoas, nos métodos calibrados.

A classificação do método quanto ao índice de confiança “c” apresentou-se bom ou muito bom, entre 0,691 (Uberlândia, HE 0,5) e 0,838 (Conceição das Alagoas). Mas sempre evoluindo acima de 0,018 com a calibração local e na regional o aumento foi de 0,032 mantendo-se como bom, justificando o ajuste do expoente empírico para o método, mas apresentando inferior a evolução que Conceição (2013) encontrou com a calibração do HE de 0,11, passando de bom (0,69) para muito bom (0,81).

Os coeficientes de determinação “ R^2 ” não foram afetados pela calibração do método por apresentar valores menores ou iguais a equação original (HE 0,5), exemplo disso são os valores encontrados na avaliação regional de 0,69 e 0,68. Coincidindo com Conceição et al. (2013) que o R^2 diminuiu de 0,81 para 0,79 e oposto ao observado por Fernandes et al. (2012) aumentando de 0,49 para 0,55, confirmando assim que tal coeficiente não está diretamente ligado a calibração.

A Figura 12 exibe a análise de regressão linear ($y = a x + b$), pelo método de Hargreaves (1994), que superestima o padrão. Kelso-Bucio et al. (2012) afirmam que a precisão aumenta com a calibração da equação, podendo ser percebida observando-se a proximidade dos pontos a reta.

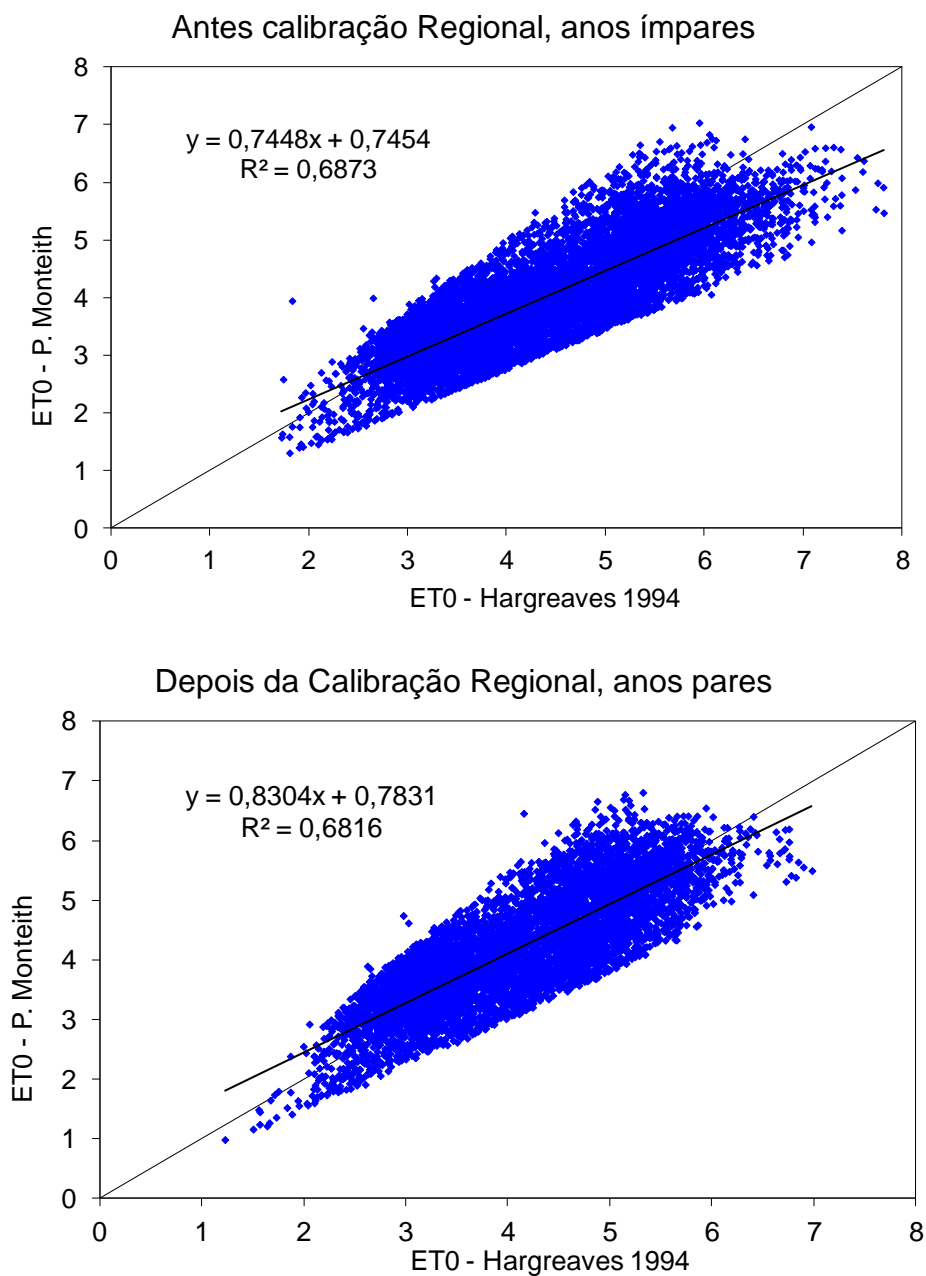


Figura 12. Correlação entre a os valores diários da ETo, obtidos com o método de Hargreaves (1994), em relação ao Penman-Monteith, para a região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro.

4.4 Avaliação do desempenho das equações de Hargreaves e Samani (1985) e Hargreaves(1994) - EToHSR x EToHGR

Tabela 7. Desempenho das equações EToHSR e EToHGR ajustadas para o processo local e regional.

Estações	Hargreaves (1994)			Hargreaves (1985)		
	EF	ERQM %	EMA	EF	ERQM %	EMA
Araxá	0,66	14,93	0,54	0,69	14,20	0,51
Campina Verde	0,70	12,14	0,43	0,73	11,61	0,41
Conceição das Alagoas	0,76	11,39	0,38	0,77	11,04	0,37
Ituiutaba	0,73	11,40	0,39	0,75	11,05	0,37
Patrocínio	0,64	13,59	0,46	0,74	11,55	0,38
Sacramento	0,67	13,27	0,47	0,69	12,87	0,45
Uberlândia	0,59	14,88	0,53	0,62	14,29	0,51
Regional	0,68	13,14	0,46	0,71	12,45	0,43

EF - eficiência do modelo; ERQM - erro relativo do quadrado médio; EMA - erro médio absoluto.

Na Tabela 7 pode-se observar os resultados obtidos, utilizando-se os critérios estatísticos, para quantificar o desempenho das equações EToHSR e EToHGR, ajustadas para o processo local e regional. No método de Hargreaves (1985), a eficiência do modelo variou de 0,62 (Uberlândia) e a 0,77 (Conceição das Alagoas). As estações Araxá e Uberlândia apresentaram os maiores valores de ERQM e EMA para os dois métodos.

A calibração regional apresentou melhor desempenho no método de Hargreaves e Samani (1985) em relação a Hargreaves (1994). Provavelmente, devido ao método de Hargreaves (1985) ter a temperatura média diária do ar, ocasionando maior precisão.

5 CONCLUSÕES

A calibração do expoente empírico (HE) é eficiente para mesorregião.

A equação de melhor desempenho para mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba é a de Hargreaves (1976).

A equação de Hargreaves (1994) é adequada para ser utilizada na mesorregião Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, utilizando apenas medição temperatura máxima e mínima.

As equações de Hargreaves são uma alternativa eficiente para estimar a ETo diária em locais do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, em que a disponibilidade de dados climáticos é limitada.

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.; DELGADO, R. C.; ALMEIDA, T. S.; WANDERLEY, H. S. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v.6, p.337-343, 2011.

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PERRIER, A.; PERREIRA, L.S. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, v. 43, p.1-34, 1994.

ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 122, 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).

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, nº. 1, p. 58-66, 2008.

ARRAES, F.D.D.; LIMA JUNIOR, J. C.; OLIVEIRA J.B. DE; MACEDO, K. G. DE; COURAS, Y. DE S.; OLIVEIRA, W. C. de Parametrização da equação de Hargreaves-Samani para o Estado do Pernambuco – Brasil, **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, nº. 1, p. 410 - 419, 2016

BACHOUR, R. 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.

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.

_____. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.4, p.449-466, 2008.

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**, v. 4, 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.

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**, v.16, n.4, p.380–390, 2012.

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.; 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, p. 89-97, 1997.

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

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, p.1-11, 2015.

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

CONCEIÇÃO, M. A. F. Ajuste do modelo de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência no noroeste paulista. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.7, p. 306-316, 2013.

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.

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

DROOGERS, P.; ALLEN, R.G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. **Irrigation and Drainage Systems**, v.16, p.33–45, 2002.

EXNER-KITTRIDGE, M.G.; RAINS, M.C. Case study on the accuracy and cost/effectiveness in simulating reference evapotranspiration in West-Central Florida. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.15, n.9, p.696-703, 2010.

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, 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 Agrônômica**, v.43, 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 (ETO) 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 Agrônômicas – Universidade Estadual Paulista, 2001.

GAVILÁN, P.; LORITE, I.J.; TORNERO, S.; BERENGENA, J. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. **Agricultural Water Management**, v.81, p.257–281, 2006.

GELCER, E.M.; FRAISSE, C.W.; SENTELHAS, P.C. Evaluation of methodologies to estimate reference evapotranspiration in Florida. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, v.123, p.189–195, 2010.

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.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 01, p. 96-99, 1985.

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

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Rede de estações meteorológicas automáticas.** Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia. 2011. 11 p. (Nota Técnica n. 001).

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

KELSO-BUCIO, H.A.; BÂ, K.M.; SÁNCHEZ-MORALES, S.; REYES-LÓPEZ, D. Calibración del exponente de la ecuación Hargreaves-ET_o en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. **Agrociencia**, v.46, p.221-229, 2012.

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

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.

LIANG, L.; LI, L.; LIU, Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer River basin of Northeast China. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.150. n.2. p.298-306. 2009.

LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D. D.; 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 Agrônômica**, v.47, p.447-454, 2016.

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.

MELO, G. L. DE; FERNANDES, A. L. T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, p.875-888. 2012.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETO) 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, p.300-308, 2014.

OLIVEIRA, P. J. D. de. **Integridade dos dados meteorológicos obtidos por duas estações meteorológicas automatizadas**. Jaboticabal: UNESP, 2014. 44p. Dissertação Mestrado.

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.

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, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015.

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

RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILA NOVA, N. A.; REICHART, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1989. 404p.

SANTOS, M.A. **Extração de água do solo por plantas de soja: modelagem hidrofísica e empírica.** 2011. 76 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

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

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.

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.

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.

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

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M.; SANTOS, E. S. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Fernando de Noronha. **Irriga**, v.19, p. 390-404, 2014.

SILVA, V. J.; CARVALHO, H. P.; DA SILVA, C. R.; CAMARGO, R.; TEODORO, R. E. F. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia-MG. **Bioscience Journal**, v. 27, p. 95-101, 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.

SUBBURAYAN, S., MURUGAPPAN, A., MOHAN, S. Modified Hargreaves Equation for Estimation of ETo in a Hot and Humid Location in Tamilnadu State, India. **International Journal of Engineering Science and Technology**, Tehran, v. 3, n .1, 2011.

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

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.

TEMESGEN, B.; CHING, S.; ASCE, M.; DAVIDOFF, B.; FRAME, K. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 73-84, 2005.

TRAJKOVIC, S. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. **J. Irrig. Drain Eng.** 133, p. 38-42. 2007.

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 JUNIOR, D. L. . Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, v. 13, p. 63-80, 2008.

VEGA, E. C.; JARA, J. C. Estimación de la evapotranspiración de referencia para das zonas (Costa Y Región Andina) del Ecuador. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, set. 2009.

WIDMOSER, P. A discussion on and alternative to Penman–Monteith equation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n. 96, p. 711–721, 2009.

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

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

WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, v. 27, p. 13-19, 1998.

_____. **Resolução CBH-Araguari Nº 12 de 25 de junho de 2009.** Aprova a metodologia e os valores de cobrança pelos usos dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Araguari. 2009.

_____. Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** **131**, p. 316-323. 2005.

ANEXO

Anexo - 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/cm²/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