

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

**INTEGRIDADE DOS DADOS METEOROLÓGICOS OBTIDOS
POR DUAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS
AUTOMATIZADAS**

**Paulo José Desiderio de Oliveira
Especialista em Gestão de Tecnologia da Informação**

2014

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

**INTEGRIDADE DOS DADOS METEOROLÓGICOS OBTIDOS
POR DUAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS
AUTOMATIZADAS**

Paulo José Desiderio de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

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

2014

O48i Oliveira, Paulo José Desidério de
Integridade dos dados meteorológicos obtidos por duas estações meteorológicas automatizadas / Paulo José Desidério de Oliveira. -- Jaboticabal, 2014
vi, 44 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2014

Orientador: José Eduardo Pitelli Turco

Banca examinadora: João Antônio Galbiatti, Antônio Carlos Barreto
Bibliografia

1. Irrigação. 2. Evapotranspiração. 3. Meteorologia-Estação meteorológica automatizada. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.674:551.573:551.5



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: INTEGRIDADE DOS DADOS METEOROLÓGICOS OBTIDOS POR DUAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMATIZADAS

AUTOR: PAULO JOSÉ DESIDERIO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE EDUARDO PITELLI TURCO

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

Prof. Dr. JOSE EDUARDO PITELLI TURCO

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. JOAO ANTONIO GALBIATTI

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. ANTONIO CARLOS BARRETO

Departamento de Irrigação / Instituto Federal do Triângulo Mineiro / Uberaba/MG

Data da realização: 25 de junho de 2014.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Paulo José Desiderio de Oliveira, nascido em 04 de maio de 1963, em Monte Alto – SP, é Tecnólogo em Processamento de Dados formado pela Universidade de Franca, Especialista em Gestão de Tecnologia da Informação pelo Centro Universitário Barão de Mauá e em Governança Pública e Novos Arranjos de Gestão pela Unesp de Araraquara. Tem experiência de atuação profissional em Tecnologia da Informação e Docência em cursos de graduação nas áreas de tecnologia da informação, administração, produção industrial, agronomia e agronegócios. Em agosto de 2012 ingressou no curso de Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo pela FCAV Unesp de Jaboticabal, desenvolvendo trabalhos na área da engenharia de água e solo, relacionados a qualidade e integridade de dados agrometeorológicos para fins de automação, planejamento e manejo de irrigação.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, mestre dos mestres, pelos seus ensinamentos, fidelidade e sentido da vida, e a meus pais, Paulo Desidério de Oliveira e Vilda Carvalho de Oliveira (in memoriam), pelos exemplos de retidão, perseverança e amor.

Com amor ágape, ofereço este trabalho a minha família, minhas paixões Solange, Paula, Lucas, Alice e Clara, pela compreensão e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP-Jaboticabal), pela condução do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo e pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao professor doutor José Eduardo Pitelli Turco, pela orientação, apoio, incentivo e pela amizade construída durante a realização deste trabalho.

Ao SINDA – Sistema Integrado de Dados Ambientais do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela disponibilização dos dados meteorológicos utilizados como parte da pesquisa.

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

Aos colegas de turmas, pelo apoio, estímulo e convívio, e a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Evaporação e Evapotranspiração.....	3
2.2. Métodos para obtenção da evapotranspiração.....	4
2.3. Sistemas automáticos de aquisição de dados.....	6
2.4 Principais elementos meteorológicos.....	8
2.4.1. Temperatura do ar.....	8
2.4.2. Umidade do ar.....	8
2.4.3. Radiação solar.....	9
2.4.4. Velocidade do vento.....	9
2.4.5. Chuva.....	9
2.5. Estações meteorológicas automatizadas.....	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1. Localização da pesquisa e coleta de dados.....	17
3.2. Técnicas descritas por Allen (1996).....	20
3.2.1. Radiação solar.....	20
3.2.1.1. Comparações a céu limpo.....	20
3.2.2. Radiação líquida.....	24
3.2.2.1. Comparando medidas de equações de computador.....	24
3.2.3. Umidade do ar.....	24
3.2.3.1. Duplicação dos instrumentos de UR.....	25
3.2.3.2. Umidade relativa diária máxima.....	25
3.2.4. Velocidade do vento.....	25
3.2.5. Temperatura do ar e precipitação pluviométrica.....	26
3.2.5.1. Técnicas de “Análise de Massa Dupla”.....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28

4.1. Avaliação da integridade dos dados da estação meteorológica automática de referência.....	28
4.2. Avaliação da integridade dos dados das estações meteorológicas automáticas estudadas.....	31
5. CONCLUSÕES.....	38
6. REFERÊNCIAS.....	39

INTEGRIDADE DOS DADOS METEOROLÓGICOS OBTIDOS POR DUAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMATIZADAS

RESUMO – A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) é utilizada tanto para o planejamento quanto para o manejo da irrigação. Dados meteorológicos de qualidade duvidosa, obtidos em estações meteorológicas automáticas para estimativa da ET_o, podem conduzir ao manejo inadequado da irrigação. Com este trabalho a finalidade foi avaliar a integridade dos dados de duas estações meteorológicas automáticas, para a estimativa da ET_o. Os dados meteorológicos avaliados foram das seguintes variáveis: radiação solar global, temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento e precipitação pluviométrica. As estações estão instaladas na FCAV/UNESP, Campus de Jaboticabal, SP. Foram aplicadas técnicas que verificam a integridade dos dados meteorológicos para estimativa da ET_o, e conforme os critérios desta, os dados de umidade relativa e velocidade do vento das duas estações não foram aceitáveis. A análise dos resultados leva a concluir que, nas estações estudadas, é recomendável a duplicação dos sensores de temperatura do ar e umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação.

PALAVRAS-CHAVE: irrigação, evapotranspiração-integridade de dados, meteorologia-estação meteorológica automatizada.

INTEGRITY OF THE METEOROLOGICAL DATA OBTAINED BY TWO AUTOMATED WEATHER STATIONS

ABSTRACT – The estimation of reference evapotranspiration (ET_o) is used both for planning and for irrigation management. Meteorological data of dubious quality, obtained from automatic weather stations to estimate ET_o, can lead to improper irrigation management. The purpose of this study was to evaluate the integrity of data from two automatic weather stations to estimate ET_o. The meteorological data were evaluated for the following variables: solar radiation, air temperature, air humidity, wind speed and rainfall. The stations are installed in FCAV / UNESP, Jaboticabal, SP. Techniques that verify the integrity of weather data for estimating ET_o, and according to this criteria, the data relative humidity and wind speed of the two stations were applied were not acceptable. The analysis leads to the conclusion that, in the studied stations, we recommend doubling the sensors for air temperature and relative humidity, wind speed and precipitation.

KEYWORDS: irrigation, evapotranspiration, data integrity, automated meteorological weather-station.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Representação esquemática da composição de um sistema de aquisição de dados e dos sensores utilizados em uma estação meteorológica automática.....	7
Figura 2. Rede agrometeorológica de Ilha Solteira.....	12
Figura 3. Plataformas de coletas de dados.....	13
Figura 4. Satélite SCD-1.....	14
Figura 5. Comunicação PCD's – Satélites – Bases.....	14
Figura 6. Estação meteorológica automatizada do Departamento de Ciências Exatas (DCE).....	18
Figura 7. Estação meteorológica automatizada do sistema integrado de dados ambientais (SINDA).....	18
Figura 8. Radiação solar medida (estação meteorológica de referência) e R_{so} estimada por três equações.....	29
Figura 9. Valores diários da umidade relativa máxima e umidade relativa mínima da estação meteorológica de referência.....	29
Figura 10. Valores diários da umidade relativa máxima e umidade relativa mínima da estação meteorológica da Davis.....	29
Figura 11. Soma acumulativa da temperatura máxima e mínima da estação meteorológica de referência.....	30
Figura 12. Soma acumulativa da temperatura máxima e mínima da estação meteorológica da Davis.....	30
Figura 13. Soma acumulativa da temperatura máxima e mínima da estação meteorológica convencional.....	30
Figura 14. Soma acumulativa da temperatura máxima e mínima da estação meteorológica de referência.....	30
Figura 15. Soma acumulativa da velocidade do vento das estações meteorológicas de referência e da Davis.....	31
Figura 16. Radiação solar medida (estação meteorológica do DCE) e R_{so} estimada por três equações.....	32
Figura 17. Radiação solar medida (estação meteorológica do SINDA) e R_{so}	

estimada por três equações.....	32
Figura 18. Soma acumulativa da temperatura máxima da estação meteorológica do DCE.....	33
Figura 19. Soma acumulativa da temperatura máxima da estação meteorológica do SINDA.....	33
Figura 20. Soma acumulativa da temperatura mínima da estação meteorológica do DCE.....	33
Figura 21. Soma acumulativa da temperatura mínima da estação meteorológica do SINDA.....	33
Figura 22. Valores diários da umidade relativa máxima e umidade relativa mínima da estação meteorológica do DCE.....	34
Figura 23. Valores diários da umidade relativa máxima e umidade relativa mínima da estação meteorológica do SINDA.....	34
Figura 24. Soma acumulativa da velocidade do vento da estação meteorológica do DCE.....	35
Figura 25. Soma acumulativa da velocidade do vento da estação meteorológica do SINDA.....	35
Figura 26. Soma acumulativa da precipitação da estação meteorológica do DCE.....	36
Figura 27. Soma acumulativa da precipitação da estação meteorológica do SINDA.....	36
Figura 28. Soma acumulativa da ETo das estações meteorológicas no período primavera – verão.....	37
Figura 29. Soma acumulativa da ETo das estações meteorológicas no período outono – inverno.....	37

1. INTRODUÇÃO

A determinação da evapotranspiração é um problema compartilhado por várias ciências que estudam o sistema solo-planta-atmosfera. Devido à necessidade de se conhecer a perda d'água de superfícies vegetadas, vários pesquisadores desenvolveram métodos de estimativa da evapotranspiração. Uma maneira muito utilizada para obter a evapotranspiração de referência (ET_o) em diferentes situações e locais é por meio de métodos de estimativa, ou seja, métodos indiretos. Esses são utilizados devido às dificuldades instrumentais dos métodos de medidas diretas.

Informações sobre a evapotranspiração de referência são instrumentos fundamentais tanto para o planejamento quanto para o manejo da irrigação. Assim, a não verificação da integridade dos dados meteorológicos para estimativa da evapotranspiração de referência, bem como o erro, devido ao uso de instrumentos de medidas, em geral podem conduzir ao manejo inadequado da irrigação. Aplicações de lâminas d'água insuficientes ou em excesso resultam em perdas e prejuízos consideráveis às plantas e ao solo, diminuindo, dessa forma, a eficiência do uso de irrigação.

Há uma tendência à utilização de estações meteorológicas automatizadas, que auxiliam na determinação da ET_o, com o intuito de diminuir os erros na lâmina de água a ser aplicada na cultura. As estações meteorológicas automatizadas tem proporcionado precisão e rapidez na coleta de dados, facilitando o seu uso nas estimativas da ET_o, principalmente pelo método Penman-Monteith (BAUSCH, 1990).

No Brasil, as estações meteorológicas automatizadas estão sendo utilizadas com muita frequência e as marcas que se destacam são da Campbell Scientific, Inc e Davis Instruments. As duas oferecem "tecnologia de ponta". As estações da Davis têm preços mais acessíveis e são utilizadas em centros educativos e universidades, assim como no setor agrícola, na indústria, em pesquisas, agências governamentais e também por particulares.

A estimativa da evapotranspiração de referência está diretamente relacionada à qualidade dos dados climatológicos em que se baseia. O uso de estações meteorológicas automáticas fornece um sistema completo de informações meteorológicas de modo prático e funcional. Além da observação permanente do funcionamento dos aparelhos eletrônicos, é necessária uma análise para avaliar a integridade dos dados, sua qualidade e sua confiabilidade, antes de serem utilizados nas equações de estimativa da ETo.

Mediante a importância e a necessidade de disponibilizar informações científicas e técnicas, com o presente trabalho o objetivo foi avaliar a integridade dos dados meteorológicos de duas estações meteorológicas automatizadas, para estimativa diária da evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Três são os reservatórios naturais de água da terra: os reservatórios de água livre (lagos, rios, canais, etc.) denominados de “superfície d’água livre”, os poros capilares que caracterizam a capacidade de contenção ou armazenamento de água do solo e os tecidos das plantas. A perda de água em cada um desses reservatórios é sempre condicionada pelos elementos do clima, com influência direta da radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

2.1. Evaporação e Evapotranspiração

Define-se evaporação como a taxa de transferência da água contida em um reservatório natural qualquer para a atmosfera. É usualmente expressa em altura de lâmina d’água/unidade de tempo, ou seja: $1 \text{ milímetro dia}^{-1} = 1 \text{ litro m}^{-2} \text{ dia}^{-1} = 10 \text{ m}^3 \text{ hectare}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Usualmente, os seguintes termos são consagrados: a) Evaporação: refere-se à evaporação de superfície d’água livre e evaporação de solo sem vegetação e b) Evapotranspiração: refere-se à evaporação de solos vegetados (VILLA NOVA e REICHARDT, 1989).

A perda de água de um solo ou de um reservatório de água é um processo controlado por leis físicas, ao passo que a perda de água por uma planta é influenciada por fenômenos físicos e biológicos. A perda global é denominada de evapotranspiração, a qual pode ser definida como um processo combinado de transferência de água do solo para atmosfera, incluindo evaporação da água do solo diretamente e o processo de transpiração através dos tecidos vegetais. A evapotranspiração pode ser expressa como quantidade equivalente de água evaporada por unidade de tempo, geralmente expressa como lâmina d’água por unidade de tempo, mm dia^{-1} (BURMAN et al., 1983).

2.2. Métodos para obtenção da Evapotranspiração

O conhecimento das necessidades hídricas das culturas é de grande importância para o estudo do manejo da água utilizada na agricultura irrigada, e a quantificação da evapotranspiração é imprescindível para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação (ORTEGA-FARIAS; IRMAK; CUENGA, 2009).

A evapotranspiração de referência (ET_0) é definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23, com altura uniforme, sem restrições de água, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo (ALLEN et al., 2006). Segundo o mesmo autor, em 1990, os diferentes métodos para estimativa da evapotranspiração de referência recomendados pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO em 1977 foram submetidos a uma revisão feita por especialistas em evapotranspiração, os quais chegaram à conclusão de que o método FAO Penman-Monteith apresentava melhores resultados para estimativa da ET_0 com parâmetros climáticos, passando a ser recomendado pela FAO como método padrão para estimativa da ET_0 .

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

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

balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões.

Muitos pesquisadores têm estudado a aplicação de técnicas para a estimativa da ET_0 , até então aplicadas, especificamente, a outras áreas do conhecimento. Verifica-se, por exemplo, a aplicação de redes neurais em trabalhos de Kumar et al. (2008), Kumar, Raghuwanshi e Singh (2010) e Landeras, Ortiz-Barreto e López (2008). Assim como, para efeito de planejamento de uso do solo, existem estimativas de ET_0 efetuadas com base em imagens de satélites, tais como as apresentadas em pesquisas desenvolvidas por Bezerra, Silva e Ferreira (2008); Folhes, Rennó e Soares (2009) e Liang, Li e Liu (2010).

Existe um número muito grande de métodos que possibilitam estimar a ET_0 , os mais comumente encontrados na literatura são os métodos baseados em equações matemáticas, empíricas com fundamentação física (CHAUHAN; SHRIVASTAVA, 2009; FOOLADMAND; AHMADI, 2009). Muitos destes métodos possuem variantes, por questões de ajustes e calibrações locais, elevando ainda mais, a quantidade de métodos disponíveis.

O método de Penman-Monteith-FAO (PM-FAO) é um aperfeiçoamento do método original de Penman (PEN) e, diversos estudos, no Brasil e no mundo, têm comprovado que este método aperfeiçoado é bastante preciso (BARROS et al., 2009; LÓPEZ-URREA et al., 2006; XU; CHEN, 2005; YODER; ODHIAMBO; WRIGHT, 2005). O método PM-FAO é amplamente utilizado porque facilita o entendimento dos processos físicos da evaporação de superfícies naturais e, também, porque utiliza informações meteorológicas coletadas em um único nível acima da superfície evaporante. Este método é classificado como um método combinado, pois associa os efeitos do balanço de energia e dos termos aerodinâmicos na estimativa da evapotranspiração (JABLON; SAHLI, 2008).

O uso de dados climáticos médios, em métodos combinados, ou seja, envolvendo os componentes aerodinâmico e radioativo, como é o caso do método PM-FAO pode conduzir a erros, resultante das combinações entre os elementos climáticos. O método PM-FAO pode também, variar bastante, quanto a estimativa do

saldo de radiação, quando não se dispõe de medições, o que foi estudado por Turco, Faria e Fernandes (2005) em Jaboticabal - SP e Yin et al. (2008) na China.

2.3. Sistemas Automáticos de Aquisição de Dados

Segundo Marin (2005), dados são definidos como símbolos brutos, sem significado maior além da sua própria existência, mas, constituem a base fundamental do conhecimento científico.

A descrição de fenômenos naturais envolve a realização de medidas que devem ser obtidas seguindo protocolos bem estabelecidos e expressas de uma maneira clara. Para o estudo da atmosfera, é necessário monitorar e descrever um sistema em contínua movimentação, tornando necessário o acompanhamento contínuo e simultâneo de diversas variáveis meteorológicas.

Segundo Lang (1987) as principais vantagens advindas do uso de sistemas automáticos de aquisição de dados para a realização de medidas são as seguintes: apresentam baixo consumo de energia; permitem obter medidas com alta frequência temporal; apresentam grande flexibilidade para a transmissão e transferência dos dados; têm alta confiabilidade e grande versatilidade de aplicações.

Segundo Bentley (1992), uma parte importante de um sistema de aquisição de dados é a que trata da medição propriamente dita, composta pelos seguintes elementos: 1) elemento sensor, 2) elemento condicionador de sinal, 3) elemento de processamento de sinal e, 4) elemento de representação numérica do sinal. Com a evolução da eletrônica e o surgimento dos microprocessadores digitais, foi possível integrar num único sistema os componentes anteriormente individualizados, dando origem aos "dataloggers", que têm capacidade de operar (coletando, processando e armazenando dados) independentemente de um computador, mas normalmente permitem a conexão com computadores para visualização em tempo real dos dados coletados.

Um sistema automático de aquisição de dados é constituído basicamente de três partes físicas principais: a central de processamento e armazenamento; as vias de comunicação; e a fonte para o suprimento de energia (Figura 1). Integrando-se a este sistema, somam-se os sensores para a realização das medidas, conforme o esquema da Figura 1, representando uma estação meteorológica automática.

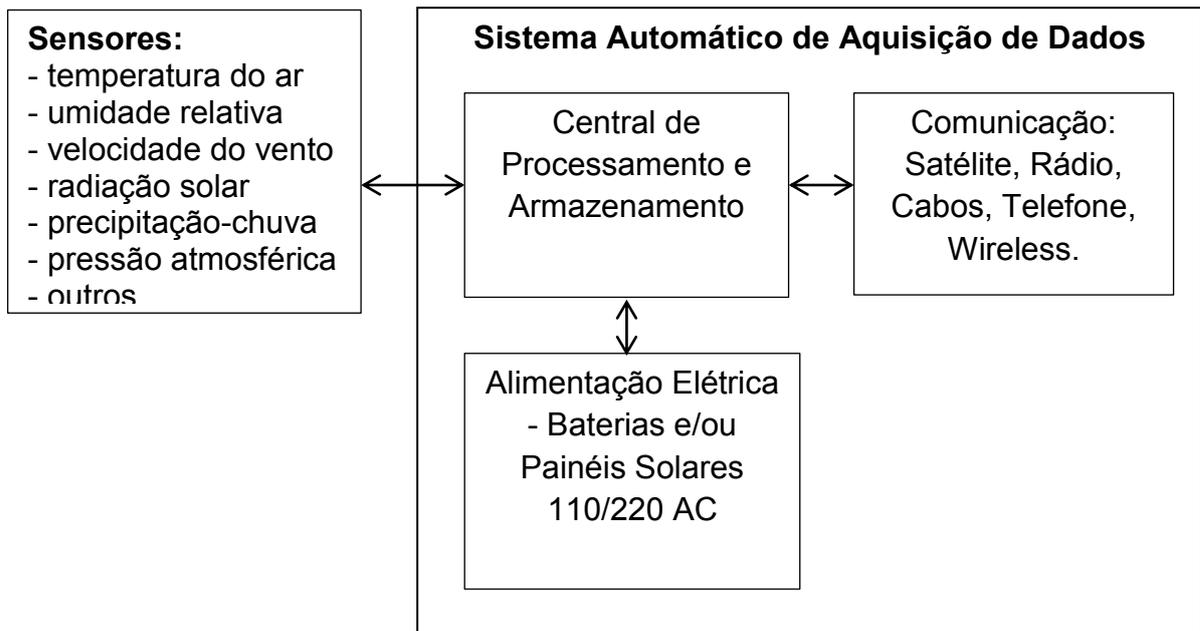


Figura 1. Representação esquemática da composição de um sistema de aquisição de dados e dos sensores utilizados em uma estação meteorológica automática

De modo geral, as medidas das grandezas físicas (radiação solar, temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica, velocidade do vento etc.) geram sinais elétricos que podem ser quantificados e registrados pelos sistemas de aquisição. A conversão das informações físicas para qualquer outra classe de informação é feita pelos sensores utilizados para as medidas de interesse.

Tecnicamente, os sensores podem ser genericamente denominados de transdutores.

Normalmente, um valor medido não é igual ao valor real da variável e, para se representar adequadamente a medição de uma grandeza é necessário compreender os conceitos de precisão, acurácia e erro. Precisão pode ser definida como a variabilidade observada entre uma série numerosa de medidas e indica o grau de

dispersão dos dados obtidos em relação à média das observações, representando o erro aleatório associado a uma medida. A acurácia representa a verificação de uma medida comparada com um valor “real”, e dá ideia do erro sistemático associado à realização da medida. À menor variação significativa mensurável do equipamento, podemos atribuir o conceito de resolução. O erro sistemático explica a tendência constante de desvio em relação ao valor real, mesmo após sucessivas medidas, já o componente aleatório do erro experimental, diferentemente, representa a variação em torno do valor real após uma sequência de medidas, podendo ser causado por diversos fatores que influem na aquisição automática de dados. No caso de medidas das grandezas atmosféricas, tais erros podem decorrer aos os ruídos eletrônicos do sistema automático, à flutuação de temperatura do ambiente, incidência de vento ou operação inadequada do sensor ou sistema de aquisição (Fritschen & Gay, 1979).

2.4. Principais elementos meteorológicos

2.4.1. Temperatura do ar

A temperatura é uma grandeza intensiva que governa a transferência de energia térmica de um sistema para outro, e representa a energia cinética associada às moléculas que compõem o sistema no qual se realiza a medida e, de certa forma, a medida da temperatura dá ideia da intensidade e a frequência de colisões dessas moléculas com o elemento sensor. Na maioria das vezes, a acurácia ou exatidão da medida depende mais de fatores que influenciam a temperatura do sensor propriamente dito do que suas características ou interferências de natureza eletroeletrônica. (MARIN 2005).

2.4.2. Umidade do Ar

Uma das variáveis mais difíceis de quantificar, o vapor de água é um constituinte normal da atmosfera. Os sensores capacitivos são os mais utilizados, por terem um custo menor, boa precisão e estabilidade temporal. Outro sensor

comum é o psicrométrico, que possibilita medidas acuradas e à baixo custo, no entanto, é necessário manter frequentemente o bulbo úmido. Todos os sensores de umidade são sensíveis à presença de contaminantes no ar (White & Ross, 1991). Os principais problemas decorrentes da ação desses poluentes são a perda de acurácia, alteração do tempo de resposta e redução da vida útil do sensor.

2.4.3. Radiação Solar

Segundo Marin (2005), a energia radiante pode ser medida de três formas: (1) pelo aumento da temperatura em função da incidência de radiação sobre uma superfície receptora, (2) pela resposta de uma célula fotoelétrica e (3) por métodos fotoquímicos. Os piranômetros mais comuns utilizados em estações meteorológicas automáticas são os constituídos por termopilhas – detectando a elevação da temperatura como efeito da incidência de radiação - e por fotodiodos de silício, um tipo de célula fotoelétrica.

2.4.4. Velocidade do Vento

Os anemômetros normalmente utilizados em estações meteorológicas automáticas são os de canecas, geralmente em número de três, girando em torno de um eixo vertical. Este tipo de anemômetro quantifica o vento em todas as direções, o que, algumas vezes, pode levar a superestimativa da velocidade do vento horizontal em alguns pontos percentuais nas situações em que há forte movimento convectivo (MARIN 2005).

2.4.5. Chuva

Os pluviômetros de balança são os mais utilizados em estações meteorológicas automáticas devido ao seu baixo custo e à sua simplicidade,

permitindo a determinação tanto da altura de precipitação quanto da intensidade. Mas não é raro o relato de que este tipo de sensor apresenta erros na totalização da chuva medida, especialmente para precipitações mais intensas. A resolução de medida do sensor, a área de captação e a ação de ventos intensos são outros fatores que interferem na qualidade da medida com pluviômetros de balança (SEIBERT & MORÉN, 1999).

Os erros associados à resolução de medida do pluviômetro são os mais comuns e sua origem reside na dificuldade do sensor em computar chuvas intensas e em sensores com grande área de captação (SENTELHAS & CARAMORI, 2002). No processo de registro da chuva, no intervalo de tempo em que a balança está em movimento, certo volume de água não é adequadamente conduzido ao recipiente que se eleva, havendo assim uma submedida da altura pluviométrica. Esse tipo de erro tende a ser maior conforme aumenta a intensidade da chuva, dado que o movimento da balança ocorre com maior frequência.

Segundo Tanner (1990), erros de até 10% podem ocorrer com certa frequência especialmente nos sensores de pior resolução, razão pela qual a WMO (2008) (World Meteorological Organization) recomenda que os pluviômetros de balança tenham resolução de 0,2 mm, por terem capacidade de armazenar em cada recipiente, volumes maiores que pluviômetros de 0,1 mm, com menor frequência no movimento de balança e, portanto, menor risco de erro.

2.5. Estações Meteorológicas Automatizadas

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

necessários à aplicação de um determinado modelo de estimativa de evapotranspiração (MELLO, 1998; TABARI, 2010).

Comparações na uniformidade dos dados registrados nas estações meteorológicas automáticas em relação às estações convencionais têm demonstrado ajuste eficiente entre os elementos analisados, especialmente precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, considerando os diferentes tipos de sensores, abrigos e frequência de medidas (ALMEIDA; SOUZA; ALCÂNTARA, 2008; CUNHA; MARTINS, 2004; OLIVEIRA, 2003; OLIVEIRA et al., 2010; SCARPARE et al., 2006).

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

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

Projeto de cooperação Institucional entre Embrapa Semiárido e UNESP Ilha Solteira com fomento da FACEP e FAPESP para pesquisa científica e tecnológica com foco em mudanças climáticas globais, proporcionou a implantação tanto no lado paulista (Figura 2) como no lado pernambucano, de uma rede agrometeorológica, para estudos microclimáticos, modelagem da evapotranspiração e da produtividade de água, baseadas em dados de campo e imagens de satélite, incluindo a banda termal, para a determinação da produtividade da água das principais culturas irrigadas e da vegetação natural em escala regional, subsidiando o manejo racional dos recursos hídricos na região semiárida da bacia do rio São Francisco e no



Figura 3. Plataformas de Coletas de Dados

Conforme informações disponíveis em <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>, as PCDs (Plataformas de Coleta de Dados) ou Estações Ambientais Automáticas tem como objetivo, fornecer regularmente informações colhidas em lugares remotos ou espalhadas por uma região muito extensa. O exemplo mais clássico é o das informações meteorológicas como temperatura, pressão, direção e velocidade dos ventos, umidade e outras, para serem utilizadas para fins hidrológicos, meteorológicos e agrometeorológicos. As Estações são integradas por sistema de comunicação via satélite e munidas com células solares e baterias para o seu suprimento de energia nos locais onde estão instaladas.

O Sistema de Coleta de Dados é constituído pela constelação de satélites SCD1 (Figura 4), SCD2 e CBERS2 (disponível em <http://www.crn2.inpe.br/conasat1/redepdc.php>), pelas diversas redes de plataformas de coleta de dados espalhadas pelo território nacional, pelas Estações de Recepção de Cuiabá e de Alcântara, e pelo Centro de Missão Coleta de Dados.

Neste sistema, os satélites funcionam como retransmissores de mensagens, onde a comunicação entre uma plataforma e as estações de recepção é estabelecida através dos mesmos. As plataformas são geralmente configuradas para transmitir, a cada 200 segundos, cerca de 32 bytes de dados úteis.



Figura 4. Satélite SCD-1

Os dados das plataformas retransmitidos pelos satélites e recebidos nas estações de Cuiabá ou de Alcântara são enviados para o Sistema Integrado de Dados Ambientais em Natal/RN para processamento e armazenamento (Figura 5).

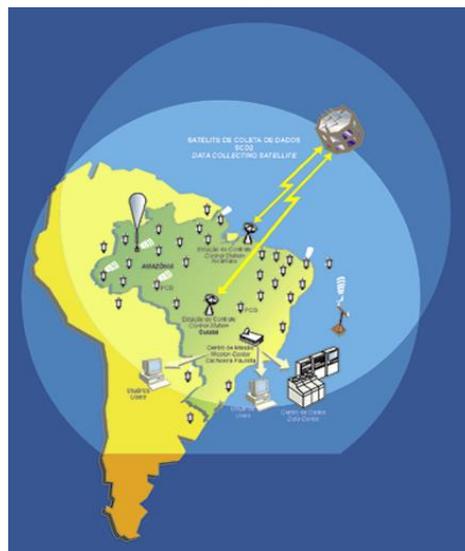


Figura 5. Comunicação PCD's - Satélites - Bases

A disseminação dos dados para os usuários está disponível no endereço: <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>. As informações dos últimos 5 dias de dados coletados pelas PCDs são colocados à disposição dos usuários em geral a cada passagem de satélite. É importante observar o aviso no site “*Estes dados são preliminares, podendo conter erros e estão sujeitos à revisão posterior. Servem apenas para uma visualização rápida e acompanhamento do processamento*”. Séries históricas de dados devem ser solicitadas através de e-mail.

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

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

Várias técnicas para avaliação da qualidade dos dados medidos em estações automáticas têm sido desenvolvidas pelo CIMIS 2014 (*Califórnia Irrigation Management Information System*). Estévez et al. (2011) apresentam algumas diretrizes para aplicação de técnicas que verificam a integridade de dados meteorológicos encontradas na literatura (MEEK & HATFIELD, 1994; REEK et al., 1992; SHAFER et al., 2000; HUBBARD, 2001), para garantia da qualidade de dados meteorológicos da Rede de Informação Agroclimático da Andaluzia (sul da Espanha). Concluíram que as diretrizes propostas são capazes de identificar os vários tipos de erros e são utilizadas

como uma ferramenta que permite tomar decisões, tais como a substituição do sensor e para remover os dados antes da sua aplicação.

Considerando a importância da avaliação da integridade de dados meteorológicos para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), Turco e Barbosa (2008) avaliaram duas estações meteorológicas das marcas Davis e Campbell, para a estimativa da ET_o, pelo método Penman- Monteith, e constataram que os dados de umidade relativa do ar das duas estações e de precipitação da Campbell não foram aceitáveis.

Bachour et al. (2013) avaliaram a evapotranspiração de referência pelo Método Hargreaves no Vale do Bekaa, no Líbano. Para esta avaliação, a integridade dos dados meteorológicos foi analisada antes de serem utilizados, adotando os procedimentos descritos em Allen (1996).

É escassa a literatura no Brasil, que trata do estudo da confiabilidade dos dados de estações meteorológicas automatizadas. Portanto, deve-se realizar estudo dessa natureza, pois há a necessidade de ser verificada a confiabilidade dos dados gerados por estações meteorológicas antes de serem utilizados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da Pesquisa e Coleta de Dados

A pesquisa foi desenvolvida na FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal-SP, situada a 21°14'05" de latitude sul, 48°17'09" de longitude oeste e altitude de 613,68 m, no período de junho 2012 a maio de 2013. O clima de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Cwa.

Os dados meteorológicos foram obtidos em uma estação meteorológica automática do Departamento de Ciências Exatas (DCE) instalada na Estação Agroclimatológica da FCAV/UNESP – Câmpus de Jaboticabal, da marca Campbell Scientific, que possui sensores de temperatura e umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar global, saldo de radiação e precipitação (<http://www.fcav.unesp.br/#!/estacao-agroclimatologica/sensores-da-estacao/>) e em uma estação meteorológica automatizada do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>), também instalada na FCAV/UNESP - Câmpus de Jaboticabal, que possui sensores de temperatura e umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar global e precipitação. As estações possuem um Sistema de Aquisição de Dados, onde os sensores foram conectados por meio de cabos.

Nas duas estações (Figuras 6 e 7) os sensores de radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar estão colocados a 1,5 m acima da superfície gramada. O sensor de velocidade do vento da estação do DCE está instalado a 2 m da superfície gramada e o do SINDA a 10 m da superfície gramada. A velocidade do vento da estação do SINDA foi corrigida para 2 m da superfície gramada adotando os procedimentos descritos em Allen et al. (2006).



Figura 6. Estação meteorológica automatizada do Departamento de Ciências Exatas (DCE)

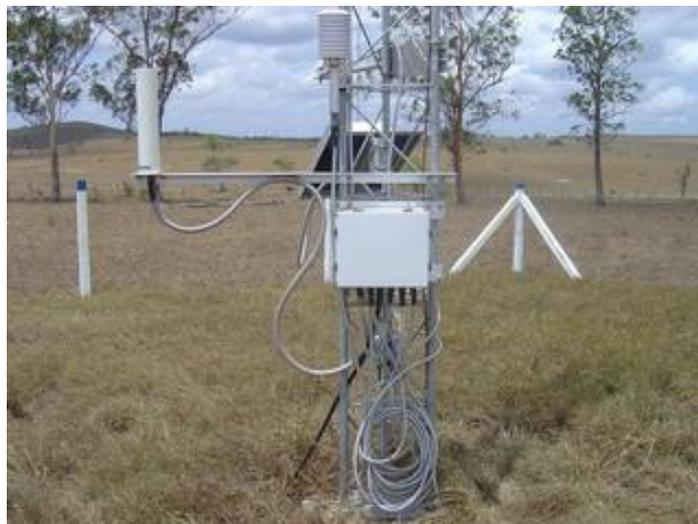


Figura 7. Estação meteorológica automatizada do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA)

Para ser avaliada, nas duas estações, a integridade dos dados meteorológicos para estimativa diária da ETo, foram aplicadas técnicas descritas por Allen (1996). Os dados

meteorológicos avaliados foram radiação solar global, temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento e precipitação pluviométrica. Os dados meteorológicos utilizados como referência foram os obtidos na estação meteorológica automática do Departamento de Engenharia Rural, da marca Campbell Scientific, onde a integridade dos dados meteorológicos foi avaliada, adotando os procedimentos descritos em Allen (1996). Os dados meteorológicos da estação da marca Campbell Scientific foram comparados aos de uma estação meteorológica da marca Davis Instruments, instalada ao seu lado e aos dados de uma estação convencional - Estação Agroclimatológica do Departamento de Ciências Exatas, da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal, SP (<http://www.fcav.unesp.br/#!/estacao-agroclimatologica/>).

A estação automatizada da Campbell Scientific possui os seguintes sensores: temperatura e umidade relativa do ar, modelo HMP45C Vaisala; velocidade do vento, modelo 03001 RM Young Co; radiação solar global, modelo CM3 Kipp & Zonen; saldo de radiação, modelo NR LITE Kipp & Zonen. A estação automatizada da Davis Instruments possui os seguintes sensores: temperatura e umidade relativa do ar, modelo 7859; velocidade do vento, modelo 7911; radiação solar global, modelo 6450; todos da marca Davis Instruments. Nas duas estações os sensores de radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar foram colocados a 1,5 m acima da superfície gramada e os sensores de velocidade do vento a 2 m da superfície gramada.

As estações meteorológicas automáticas da marca Campbell Scientific e da marca Davis Instruments estão instaladas na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal, SP. Na área experimental está plantada grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), cobrindo totalmente o solo, onde foram efetuadas irrigações para manter o solo em boas condições hídricas. A irrigação foi realizada no final da tarde, com um turno de rega de dois dias.

A quantidade de água aplicada na área experimental foi função dos valores da ETo, obtidos pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 2006). A evapotranspiração de referência foi calculada pela seguinte equação:

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

Em que,

$ETo_{(PM)}$ = evapotranspiração de referência pelo método de PM (Penman-Monteith), em gramado, mm d^{-1} ;

Rn = 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 2 m de altura, m s^{-1} ;

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

Δ = tangente à curva de pressão de vapor, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

γ = constante psicrométrica, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$, e

900 = fator de conversão de unidades.

3.2. Técnicas descritas por Allen (1996).

3.2.1. Radiação Solar

3.2.1.1. Comparações de Céu Limpo

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

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

na qual,

R_a = radiação extraterrestre;

K_T = índice de “claridade”.

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

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

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

na qual,

z = elevação da estação (m).

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

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

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

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

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

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

na qual,

P = pressão atmosférica (kPa);

W = água precipitável na atmosfera, em cm.

W pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

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

na qual,

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

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

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

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

Quando as equações (4) e (6) são utilizadas, o índice de claridade é calculado como a soma de K_B e K_D .

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

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

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

na qual,

φ = latitude da estação (rad);

δ = declinação solar (rad);

ω = ângulo de tempo solar (rad).

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

$$(\sin \Phi)_{24} = \{ \sin^2 \varphi \sin^2 \delta \omega_s + 2 \sin \varphi \sin \delta \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \cos^2 \varphi \cos^2 \delta [\omega_s/2 + \sin (2 \omega_s)/4] \} / (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (9)$$

na qual,

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

Uma simplificação da equação (9) determinada por regressão é

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

na qual,

J = dia do ano (1 a 365);

φ = latitude em graus radianos.

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

3.2.2. Radiação Líquida

3.2.2.1. Comparando medidas de equações de computador

Equação para estimar média horária e de 24h de Radiação Líquida (R_n) utilizando medidas de radiação de ondas curtas (R_s) são precisas sob a maioria das condições. Contudo, dados de R_n medidos deveriam ser plotados contra a R_n estimada utilizando equações baseadas na R_s , temperatura do ar e pressão do vapor. A maioria dessas equações pode ser aplicada mensalmente, diariamente, a cada hora ou em um pequeno intervalo de tempo.

Se os valores medidos da R_n frequentemente desviarem dos valores estimados por mais de 3 a 5%, então a calibração ou o funcionamento do aparelho de R_n (radiômetro) deve ser examinado. Comparando a R_n calculada com a medida podemos prontamente apontar dias ou períodos durante os quais o radiômetro teve um mau funcionamento devido a efeitos de sujeira, dejetos de pássaros, condensação da umidade dentro dos domos, perda de uniformidade ou perda de vegetação abaixo do sensor.

3.2.3. Umidade do Ar

Podem ocorrer erros 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.

3.2.3.1. Duplicação dos instrumentos de UR

É recomendado que os sensores de umidade relativa (UR) e de temperatura do ar utilizados em estações meteorológicas automatizadas sejam duplicados. Esta prática, que a princípio pode encarecer o projeto, pode evitar outras despesas com tempo, como reparo de defeitos e preocupações que dizem respeito à integridade dos dados de UR, e é de custo relativamente pequeno quando comparada ao valor de dados climáticos utilizados no calendário e 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 deveriam sinalizar algum tipo de problema com um ou com ambos.

3.2.3.2. Umidade relativa diária máxima

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.

3.2.4. Velocidade do Vento

É difícil de 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 ser utilizado 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 por perto. A tendência em inclinar-se entre as duas acumulações não deveria mudar ao longo do tempo.

3.2.5. Temperatura do Ar e Precipitação Pluviométrica

3.2.5.1. Técnicas de “Análise de Massa Dupla”

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 ocorreram através do tempo. Uma técnica que é utilizada para essa proposta é a da análise de massa dupla, em que somas acumulativas de um parâmetro em duas localidades são plotados um contra o outro (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 calibração em um dos instrumentos.

Essa técnica é comumente utilizada em hidrologia para avaliar os efeitos da 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 é dependente da variável meteorológica. Radiação solar e radiação líquida sob vegetação similar deveriam se correlacionar bem sob distâncias de centenas de 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.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação da integridade dos dados da estação meteorológica automática de referência.

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

A radiação solar global para dias de céu limpo, estimada pelas três equações, segue e superestima radiação solar global. Valores da UR constantemente acima de 80%, mesmo durante o período seco, sugerem que os equipamentos não têm problemas de funcionamento, calibração e aridez no local de medida. Os registros de temperatura máxima e mínima da estação meteorológica automática de referência foram comparados aos valores obtidos da estação da Davis e da Convencional, na forma acumulativa segundo a técnica da análise de massa dupla. A inclinação da reta apresentada nos gráficos de 45% indica uma boa estimativa dos dados por parte dos instrumentos, e a não visualização de nenhuma mudança na inclinação da curva acumulativa com o tempo, indica que os equipamentos estão bem calibrados e funcionando adequadamente (Figuras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15)

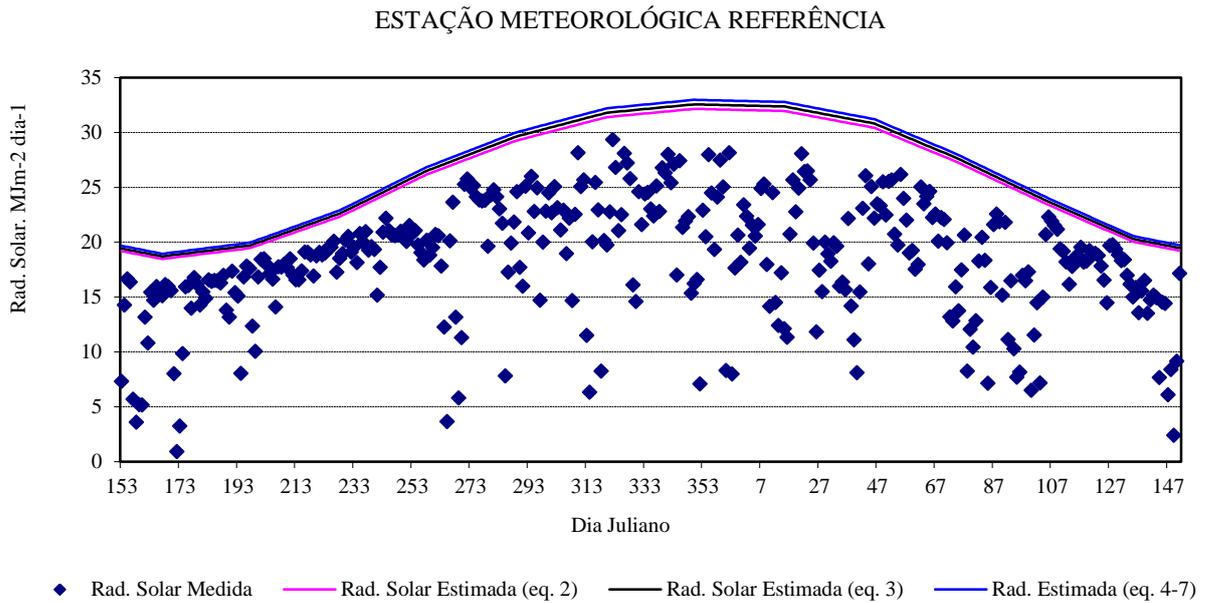


Figura 8. Radiação solar medida (Estação Meteorológica de Referência) e R_{so} estimada por três equações

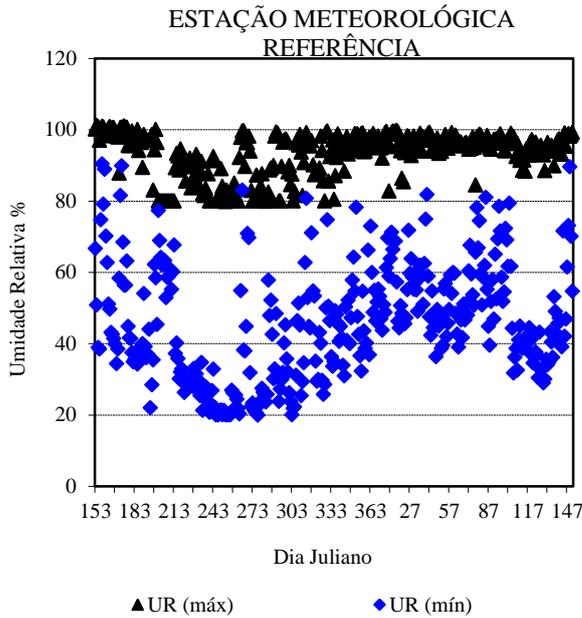


Figura 9. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica de Referência

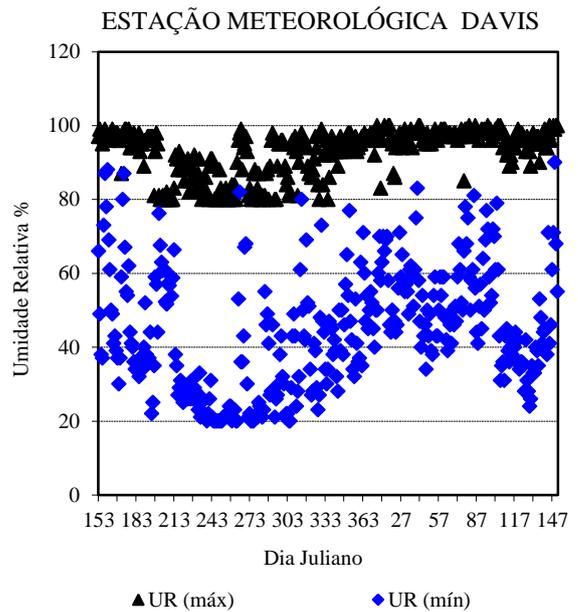


Figura 10. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica da Davis

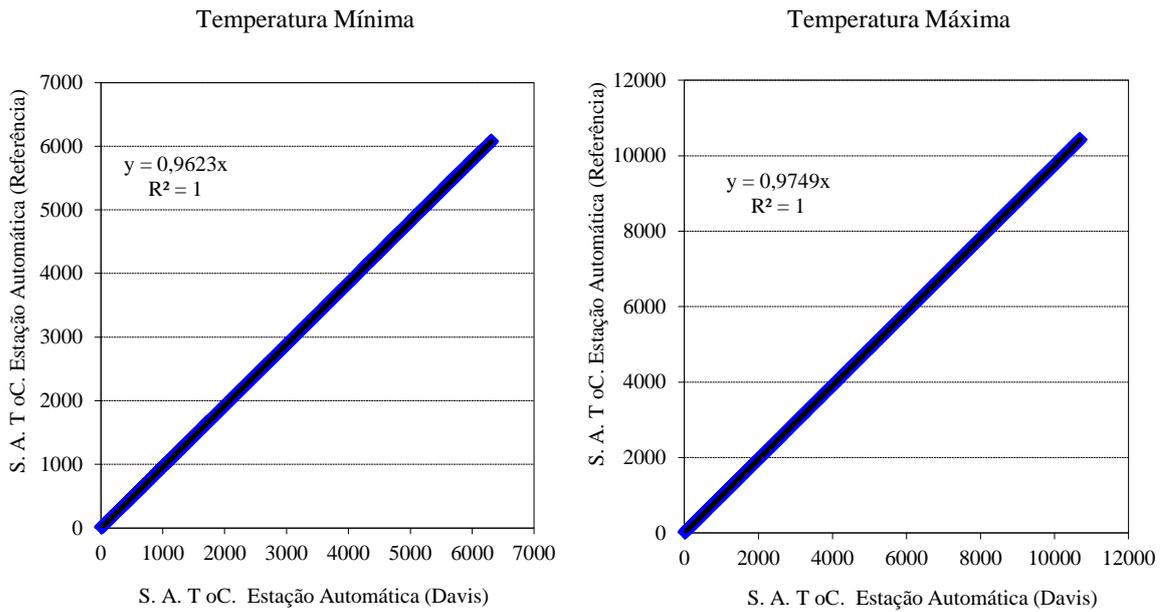


Figura 11. Soma acumulativa da Temperatura Máxima e Mínima da estação meteorológica de Referência **Figura 12. Soma acumulativa da Temperatura Máxima e Mínima da estação meteorológica da Davis**

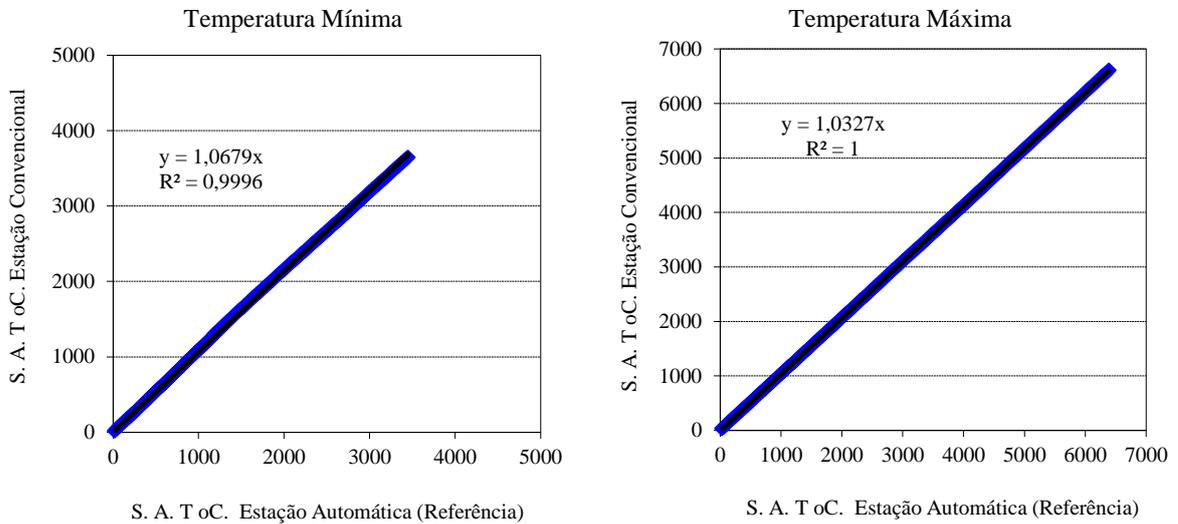


Figura 13. Soma acumulativa da Temperatura Máxima e Mínima da estação meteorológica Conventional **Figura 14. Soma acumulativa da Temperatura Máxima e Mínima da estação meteorológica de Referência**

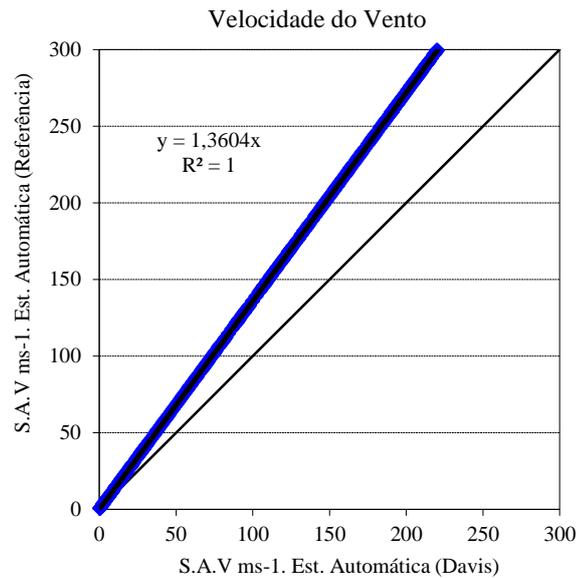


Figura 15. Soma acumulada da Velocidade do Vento das estações meteorológicas de Referência e da Davis

4.2. Avaliação da integridade dos dados das estações meteorológicas automáticas estudadas.

A radiação solar global para dias de céu limpo, estimada pelas três equações, segue e superestima radiação solar global medida pela estação meteorológica do DCE (Figura 16). Portanto, os dados de radiação solar obtidos pela estação do DCE são aceitáveis em relação aos obtidos pela técnica utilizada. Em alguns dias, os dados de radiação solar da estação meteorológica automática do SINDA não seguem e superestimam os dados estimados pelas equações (Figura 17). Portanto, não são aceitáveis e o sensor deve ser substituído.

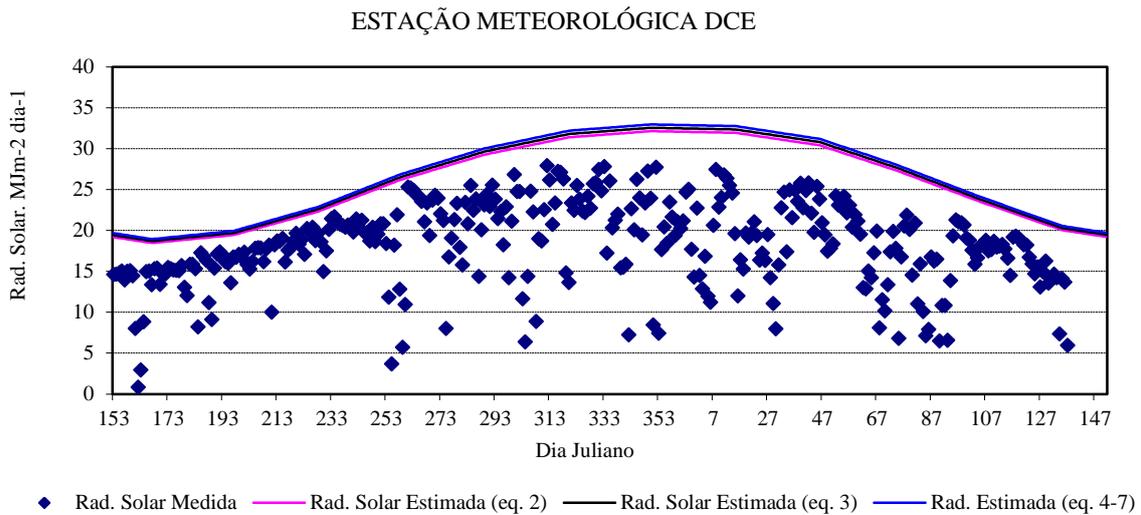


Figura 16. Radiação solar medida (Estação Meteorológica do DCE) e Rso estimada por três equações

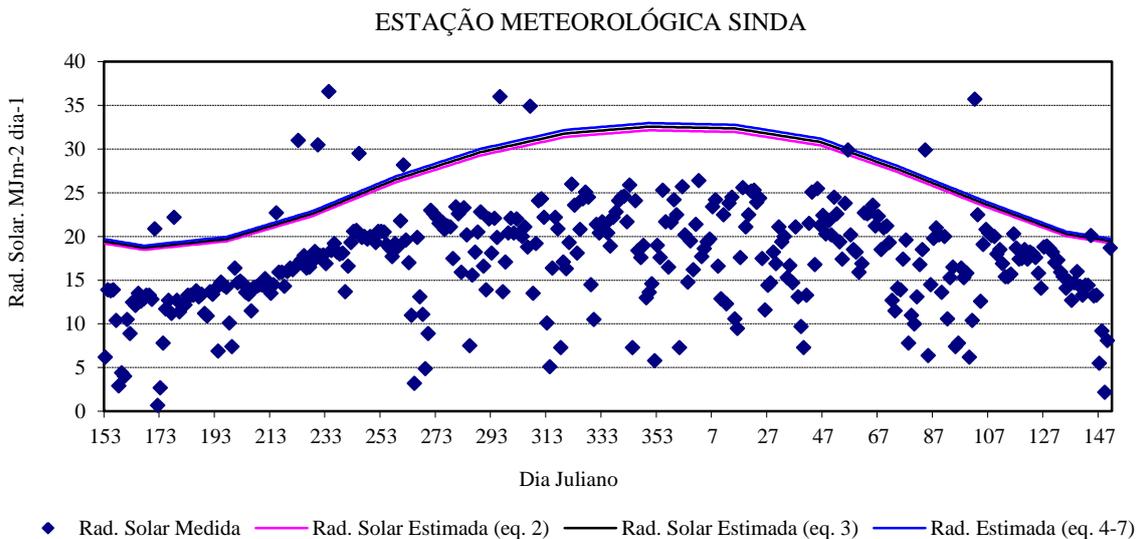


Figura 17. Radiação solar medida (Estação Meteorológica do SINDA) e Rso estimada por três equações

Os registros de temperatura máxima e mínima das estações meteorológicas do DCE e do SINDA foram comparados aos valores obtidos da estação de referência, na forma acumulativa segundo a técnica da análise de massa dupla (Figuras 18, 19, 20 e 21). A inclinação da reta apresentada nos gráficos de praticamente 45° indica uma boa estimativa dos dados.

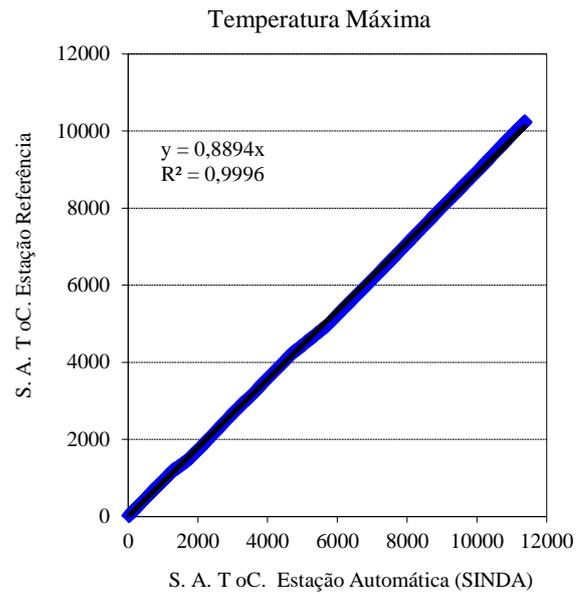
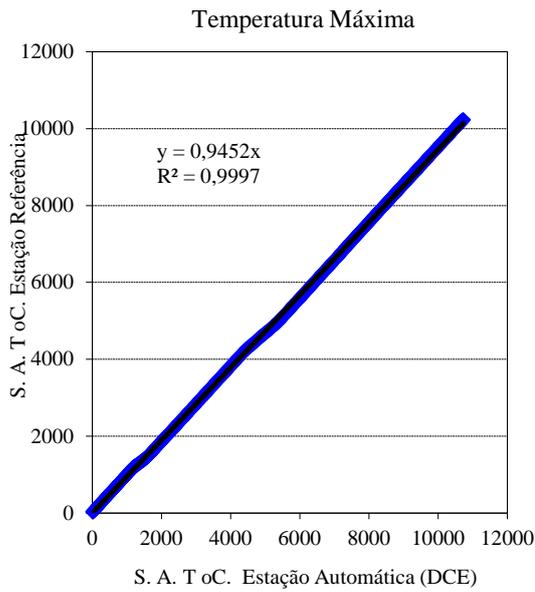


Figura 18. Soma acumulativa da Temperatura Máxima da estação meteorológica do DCE

Figura 19. Soma acumulativa da Temperatura Máxima da estação meteorológica do SINDA

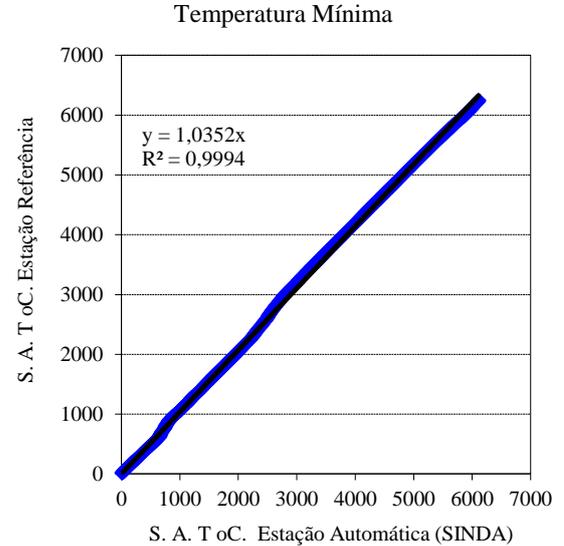
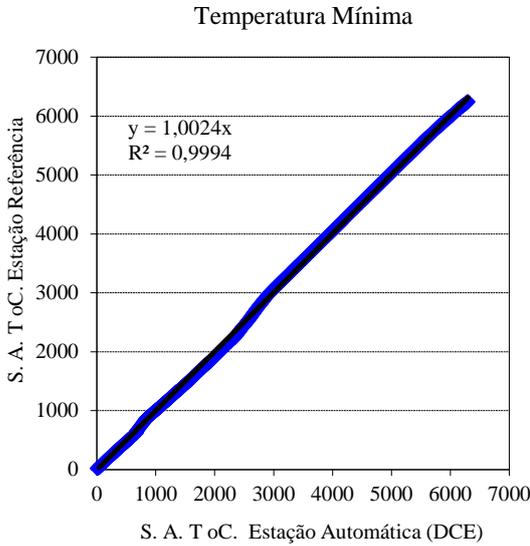


Figura 20. Soma acumulativa da Temperatura Mínima da estação meteorológica do DCE

Figura 21. Soma acumulativa da Temperatura Mínima da estação meteorológica do SINDA

Esperavam-se valores de UR máxima (Figuras 22 e 23) abaixo de 80 a 90%, mesmo durante o período úmido, uma vez que as estações estão instaladas em uma área não irrigada. Valores de umidade relativa máxima (URmax) 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. Portanto, é necessário duplicar o sensor de UR nas estações do DCE e SINDA para verificar o motivo dos valores encontrados. Nota-se na Figura 23 que existem valores acima de 100%, o que é comum para esses tipos de instrumentos de medida durante as primeiras horas da manhã ou durante precipitações. Os dados de umidade relativa máxima (URmax) da estação do DCE foram semelhantes aos obtidos por Turco e Barbosa (2008), que avaliaram a integridade dos dados de duas estações meteorológicas das marcas Davis e Campbell.

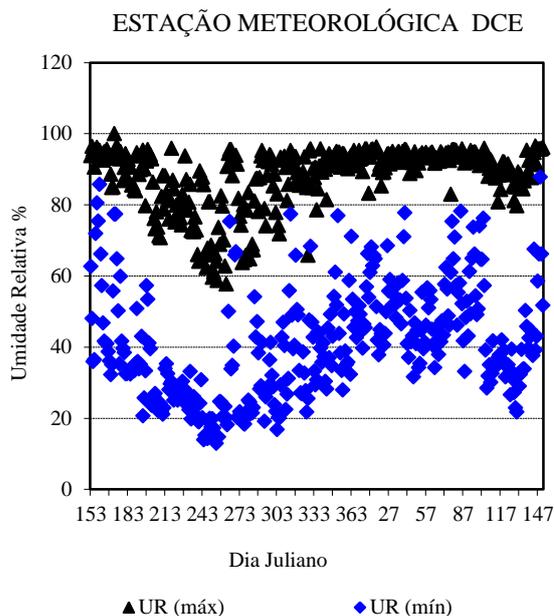


Figura 22. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica do DCE

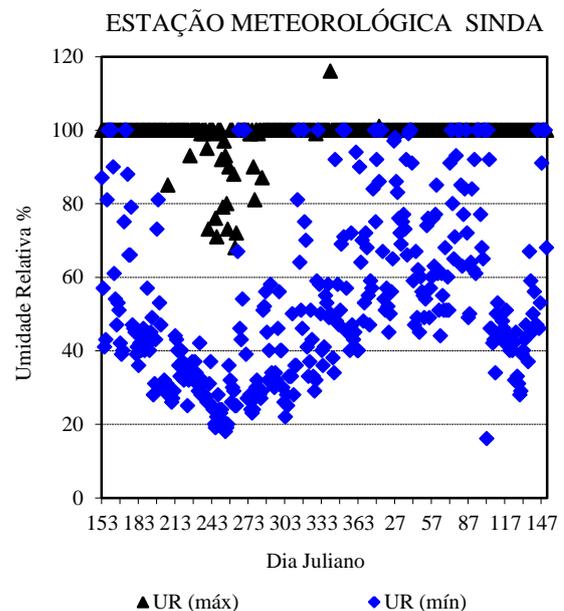


Figura 23. Valores diários da Umidade Relativa Máxima e Umidade Relativa Mínima da estação meteorológica do SINDA

Os registros de velocidade do vento das estações meteorológicas foram comparados na forma acumulativa, segundo a técnica da análise de massa dupla (Figuras 24 e 25). A inclinação da reta apresentada nos gráficos diferente de 45° não indica uma boa semelhança dos dados por parte dos instrumentos de medidas. Provavelmente a diferença dos valores obtidos na forma acumulativa dos anemômetros é devido à distância entre eles e à topografia do terreno. Portanto, é necessário duplicar o sensor de velocidade do vento das estações do DCE e do SINDA para verificar o motivo dos valores encontrados.

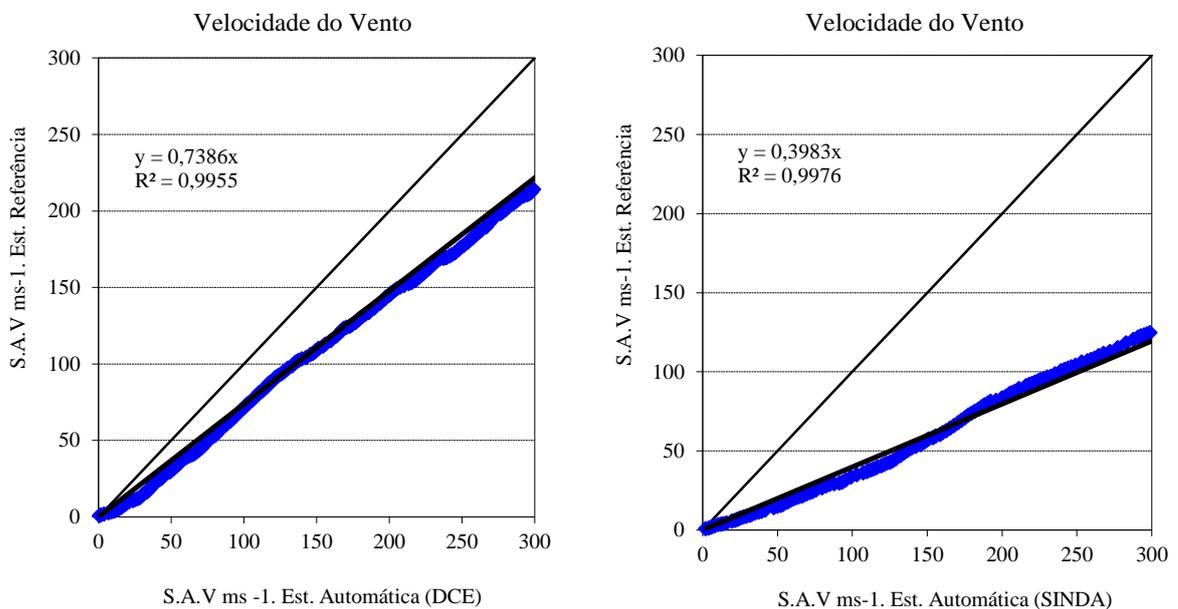


Figura 24. Soma acumulativa da Velocidade do Vento da estação meteorológica do DCE
Figura 25. Soma acumulativa da Velocidade do Vento da estação meteorológica do SINDA

Os registros de precipitação das estações meteorológicas do DCE e do SINDA foram comparados aos valores obtidos em um pluviômetro padrão (marca PARIS), na forma acumulativa segundo a técnica da análise de massa dupla (Figuras 26 e 27). A inclinação da reta apresentada na Figura 26 de praticamente 45° indica uma boa estimativa dos dados pela estação do DCE. A inclinação da reta apresentada na

Figura 27, diferente de 45° não indica uma boa estimativa dos dados pela estação do SINDA, indicando provavelmente a necessidade de recalibrar o sensor. Os dados obtidos foram semelhantes aos obtidos por Turco e Barbosa (2008) para estação meteorológica da Campbell, quando verificaram a integridade dos dados de precipitação de duas estações meteorológicas. Há necessidade de duplicar o sensor de precipitação da estação do SINDA para verificar a necessidade de calibração ou substituição do sensor.

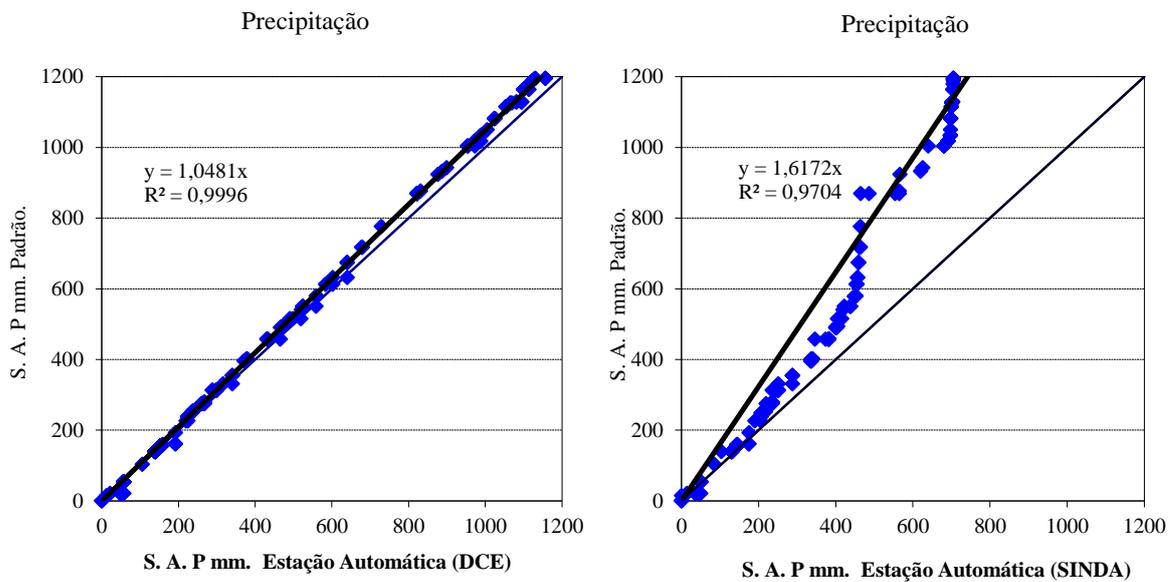


Figura 26. Soma acumulativa da Precipitação da estação meteorológica do DCE **Figura 27. Soma acumulativa da Precipitação da estação meteorológica do SINDA**

A soma acumulativa da ETo das estações meteorológicas no período primavera – verão e outono – inverno é apresentada na Figura 28 e 29. Nota-se que a ETo acumulada nas estações no período primavera-verão foi de 757,21; 654,50, e 761,15, para DCE, SINDA e REF, respectivamente. No período outono-inverno a ETo acumulada foi 579,09; 599,32 e 533,87, para DCE, SINDA e REF, respectivamente. Os resultados obtidos mostram a importância de estudos desta natureza, que possibilitam verificar a influência da integridade dos dados de estações automáticas na estimativa da evapotranspiração de referência ETo. O

impacto do erro dos dados meteorológicos na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) também foi estudado por Estéves et al. (2009).

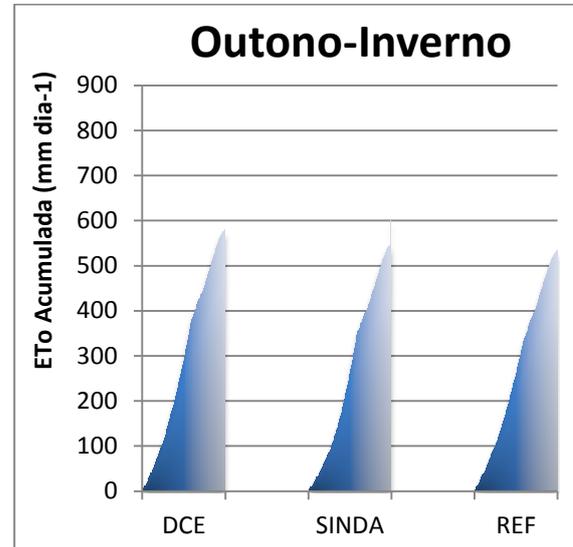
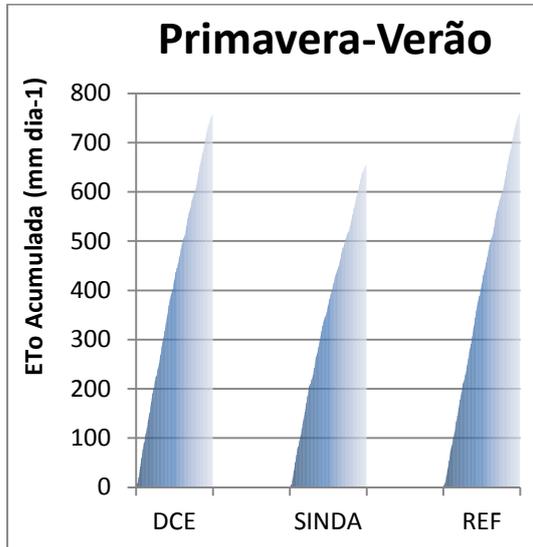


Figura 28. Soma acumulada da ET_o das estações meteorológicas no período primavera – verão

Figura 29. Soma acumulada da ET_o das estações meteorológicas no período outono - inverno

Avaliações da integridade e qualidade dos dados meteorológicos precisam ser feitas antes dos dados serem utilizados em equações de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o).

Procedimentos de verificação da integridade de dados deveriam ser adotados a toda rede de estação meteorológica agrícola, para assegurar que dados com alta qualidade estão sendo medidos e transferidos para os usuários.

5. CONCLUSÃO

Por meio da análise dos resultados, utilizando-se a técnica que verifica a integridade dos dados meteorológicos, é possível concluir, após o desenvolvimento deste trabalho, que:

É necessário duplicar os sensores de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e o de precipitação das estações meteorológicas estudadas. Pois, quando sensores duplos produzem sinais similares, então é provável que ambos estejam funcionando apropriadamente, desde que equações de calibração adequadas estejam sendo empregadas. Diferenças significantes entre sensores em um período de tempo sinalizam algum tipo de problema com um ou com ambos.

6. REFERÊNCIAS:

- ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 2, p. 97-106, 1996.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotraspiration del cultivo: guias para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estúdio Riego e Drenaje, Paper 56).
- ALMEIDA, H. A.; SOUZA, J. A.; ALCÂNTARA, H. M. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 16, n. 1, p. 58-66, 2008.
- BACHOUR, R., ASCE, S.M., WALKER, W.R., ASCE, F., TORRES-RUA, A.F., MCKEE, M. Assessment of Reference Evapotranspiration by the Hargreaves Method in the Bekaa Valley, Lebanon. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 139, n.11, p. 933-938, 2013.
- BARROS, V. R.; SOUZA, A.P.; FONSECA, D.C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.
- BAUSCH, W. C. Sensor height effects on calculated reference evapotranspiration. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, p. 791-798. 1990.
- BENTLEY, J.P. **Principles of measurement systems**. London: Longman, 503p. 1992.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM- Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- BURMAN, R.D., LARAMIE, W.Y., NIXON, P.R., WRIGHT, J.L., PRUITT, W.O. **Water requirements**. In: JENSEN, M.E. (ed). **Design and operation of farm irrigation systems**. Michigan: ASAE p.189-225, 1983. (ASAE Monograph, 3).

CALIFÓRNIA IRRIGATION MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM (CIMIS). **Publicações**. Disponível em: < <http://www.cimis.water.ca.gov/Resources.aspx> >. Acesso em: 25 mar. 2014.

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

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.

ESTÉVES, J., GAVILÁN, P., BERENGENA, J. Sensitivity analysis of a Penman-Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 3342-3353, 2009.

ESTÉVES, J., GAVILÁN, P., GIRÁLDEZ, J.V. Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. **Journal of Hydrology**, v. 402, p. 144-154, 2011.

FOLHES, M.T.; RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 10, p. 1398-1408, 2009.

FOOLADMAND, H.R.; AHMADI, S.H. Monthly spatial calibration of Blaney-Criddle equation for calculating monthly ET_0 in south of Iran. **Irrigation and Drainage**, Sidney, v. 58, n. 2, p. 234-245, 2009.

FRITSCHEN, L.J.; GAY, L.W. **Enviromental instrumentation**. Springer-Verlag: New York, 215 p. 1979.

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.** 2001. 124 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

HUBBARD, K.G. Multiple Station Quality Control Procedures. Automated Weather Stations for Applications in Agriculture and Water Resources Management. **World Meteorological Organization Tech. Doc. AGM-3 WMO/TD No. 1074**, p. 133–136, 2001.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Rede de estações meteorológicas automáticas.** Brasília, DF, 2011. 11 p. (Nota Técnica, 1).

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

KUMAR, M.; BANDYOPADHYAY, A.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Comparative study of conventional and artificial neural network-based estimation models. **Irrigation Science**, Sidney, v. 26, n. 6, p. 531-545, 2008.

KUMAR, M.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review. **Irrigation Science**, Sidney, v. 29, n. 1, p. 11-25, 2010.

LANDERAS, G.; ORTIZ-BARRETO, A.; LÓPEZ, J.J. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 5, p. 553-565, 2008.

LANG, T.T **Electronics of measuring systems:** practical implementation of analogue and digital techniques. John Willey & Sons. 318p. 1987.

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**, Amsterdam, v. 150, n. 2, p. 298-306, 2010.

LÓPEZ-URREA, R.; MARTIN, S.O.F.; FABEIRO, C.; MORATALIA, A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a Semiarid Climate. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, n. 1, p. 15-26, 2006.

MARIN, F.R. **Introdução ao uso de sistemas automáticos de aquisição de dados na agrometeorologia**. In:_____. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2005, 28 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Documentos, 56).

MEEK, D.W.; HATFIELD, J.L. Data quality checking for single station meteorological databases. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 36, p. 85-109, 1994.

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

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.

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, 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.

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

REEK, T., DOTY, S.R., OWEN, T.W. A deterministic approach to the validation of historical daily temperature and precipitation data from the Cooperative Network. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, p. 753-762, 1992.

SEIBERT, J.; MORÉN, A.S. Reducing systematic errors in rainfall measurements using a new type rain gauge. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.98-99, p.341-348, 1999.

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: 14 CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2006, Florianópolis. Sociedade Brasileira da Meteorologia, 2006.

SENTELHAS, P. C.; CARAMORI, P. H. Inconsistências na medida da chuva com pluviômetros de balsa, utilizados em estações meteorológicas automáticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 301-304, 2002.

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.

SHAFER, M.A., FIEBRICH, C.A., ARNDT, D.S., FREDRICKSON, S.E., HUGHES, T.W. Quality assurance procedures in the Oklahoma Mesonet. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, p. 474-494, 2000.

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

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

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

TURCO, J.E.P., FARIA, M.T., FERANDES, E.J. Influência da forma de obtenção do saldo de radiação na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga: Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**. Botucatu-SP, v. 10, n. 3, p. 215-228, agosto-outubro, 2005.

VILLA NOVA, N.A., REICHARDT, K. **Evaporação e Evapotranspiração**. In: RAMOS, F., OCCHIPINTI, A.G., VILA NOVA, N.A., REICHARDT, K., MAGALHÃES, P.C., CLEARY, R.W. **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH Editora UFRJ, 1989. p.145-97.

XU, C. Y.; CHEN, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 18, p. 3717-3734, 2005.

WHITE, G.M.; ROSS, I.R. Humidity. In: HENRY, Z.A.; ZOERB, G.A.; BIRTH, G.S. **Instrumentation and measurement for environmental sciences**. Saint Joseph: ASAE, p. 8.01-8.13, 1991.

WMO (World Meteorological Organization), **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation WMO-No. 8**. Geneva 2, Switzerland, p. 161-173, 2008.

Yin, Y., Wu, S., Zheng, D., Yang, Q. Radiation calibration of FAO56 Penman–Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. **Agricultural Water Management**. v. 95, I.1, p. 77–84, 2008.

YODER, R. E. ; ODHIAMBO, L. O.; WRIGHT, W. C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid Southeast United States. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 21, n. 2, p. 197-202, 2005.