

LUIZ EDUARDO VIEIRA MONTANHA

**DESEMPENHO DAS MEDIDAS DE UM LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO
CONSTANTE A PARTIR DO MODELO DE PENMAN-MONTEITH**

Botucatu

2022

LUIZ EDUARDO VIEIRA MONTANHA

**DESEMPENHO DAS MEDIDAS DE UM LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO
CONSTANTE A PARTIR DO MODELO DE PENMAN-MONTEITH**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador(a): Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Botucatu

2022

M764d

Montanha, Luiz Eduardo Vieira

Desempenho das medidas de um lisímetro de lençol freático constante a partir do modelo de Penman-Monteith / Luiz Eduardo Vieira Montanha. -- Botucatu, 2022

64 f. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Alexandre Dal Pai

1. Evapotranspiração. 2. Meteorologia. 3. Climatologia. 4. Estatística. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

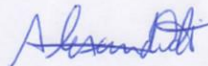
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESEMPENHO DAS MEDIDAS DE UM LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO
CONSTANTE A PARTIR DO MODELO DE PENMAN-MONTEITH

AUTOR: LUIZ EDUARDO VIEIRA MONTANHA

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Irrigação e
Drenagem), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / FCA UNESP Botucatu



Prof. Dr. RICARDO RALL (Participação Presencial)
Informática / Faculdade de Tecnologia de Botucatu



Prof.ª Dr.ª VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - UNESP



Botucatu, 30 de setembro de 2022

Ao meu amado avô,

Roque Vieira,

dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido essa oportunidade.

Aos meus queridos pais pelo apoio incondicional nessa jornada José Eduardo G. Montanha e Suely Cristina. V. Montanha.

Aos meus queridos avós Luiz Montanha, Maria Helena G. Montanha, Roque Vieira e Cirene S. Vieira pelo apoio.

A minha namorada Mayara Regina Telles Correa Barbosa, pela grande força e incentivo.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, pela orientação, ensinamentos e paciência ao longo dos anos.

A todos os demais professores envolvidos, deixo meu muito obrigado pelos conhecimentos concedidos.

A todos os meus amigos, meu muito obrigado por todo apoio e motivação, e por demonstrarem amizade nos momentos mais difíceis.

A todos os funcionários que me ajudaram e contribuíram com essa pesquisa, meu muito obrigado. Saliento minha gratidão a todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Irrigação e Drenagem, aos funcionários(as) da Seção Técnica de Pós-Graduação, da Biblioteca e da limpeza.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

Os dados adquiridos pelas estações meteorológicas e pela lisimetria são de grande importância para o monitoramento climatológico, grande auxílio em vários setores da agricultura, pesquisas científicas etc. Com o passar do tempo, mudanças climáticas são cada vez mais comuns e com isso faz-se necessário aumentar os cuidados com estes dados meteorológicos. Essas mudanças podem afetar diretamente na integridade da medida, fazendo com que não se tornem mais confiáveis, a menos que seja feita uma validação. O objetivo do trabalho foi realizar a validação dos dados coletados dos lisímetros, por meio de comparações e estimativas baseadas na literatura. As medidas presentes neste estudo foram: temperatura do ar, radiação, umidade relativa do ar, precipitação, velocidade do vento e evapotranspiração, que foram coletadas no ano de 2017 na Fazenda Lageado de Botucatu na Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) UNESP de Botucatu. O processo de validação iniciou-se com a estimativa da evapotranspiração, pelo método de Penman-Monteith e comparando-se com as medidas dos lisímetros de lençol freático constante e pesagem. Logo após foram utilizados os indicadores estatísticos MBE e RMSE para meios de comparação. Utilizou-se também o método de estimativa da radiação líquida de onda longa, proposta por Allen. A análise foi realizada com dados do período de junho a dezembro do ano de 2017 e como principais resultados encontrados pode-se observar picos de precipitação nos meses de junho, agosto e novembro, tendo como valor máximo de aproximadamente 42mm presente no mês de novembro, influenciando na aferição da evapotranspiração, a comparação comprovou que o método proposto por Allen utilizado com as medidas estimadas pelo Penman, indicaram que o lisímetro de pesagem apresentou uma melhor margem de segurança (MBE mais próximo de zero).

Palavras-chave: evapotranspiração; climatologia; meteorologia; estatística.

ABSTRACT

The data acquired by meteorological stations and by lysimetry are of great importance for climatological monitoring, a great help in various sectors of agriculture, scientific research, etc. Over time, climate changes are increasingly common and with this it is necessary to increase care with these meteorological data. These changes can directly affect the integrity of the measure, causing it to not become more reliable unless validation is performed. The objective of this work was to validate the data collected from the lysimeters, through comparisons and estimates based on the literature. The measurements present in this study were: air temperature, radiation, relative humidity, precipitation, wind speed and evapotranspiration, which were collected in 2017 at Fazenda Lageado de Botucatu at Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) UNESP de Botucatu. The validation process started with the estimation of evapotranspiration, using the Penman-Monteith method and comparing it with the measurements of the constant water table lysimeters and weighing. Soon after, the statistical indicators MBE and RMSE were used for means of comparison. We also used the long-wave net radiation estimation method proposed by Allen. The analysis was carried out with data from June to December of 2017 and as main results found it was possible to observe precipitation peaks in the months of June, August and November, with a maximum value of approximately 42 mm present in the month of November, influencing the measurement of evapotranspiration, the comparison proved that the method proposed by Allen, used with the measurements estimated by Penman, indicated that the weighing lysimeter presented a better margin of safety (MBE closer to zero).

Keywords: evapotranspiration; climatology; meteorology; statistic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Abrigo convencional e automatizado da estação meteorológica da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo	26
Figura 2 - Sensor de temperatura presente na estação meteorológica automatizada da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo.....	27
Figura 3 - Anemômetro presente na estação meteorológica automatizada da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo.....	29
Figura 4 - Pluviômetro presente na estação meteorológica automatizada da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo.....	30
Figura 5 - Radiômetro CNR1 presente na estação de radiometria solar da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo.....	31
Figura 6 – Lisímetro de drenagem.....	33
Figura 7 - Lisímetro de pesagem presente na estação de lisimetria da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo.....	34
Figura 8 - Funcionamento do lisímetro de pesagem.....	34
Figura 9 - Lisímetro de lençol freático constante antes da reforma.....	36
Figura 10 - Lisímetro de lençol freático constante presente na estação de lisimetria na Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo.....	36
Figura 11 - Funcionamento do lisímetro automatizado de lençol freático constante.....	37
Figura 12 - Série histórica de dados climáticos (1971 a 2013), contendo a temperatura média e umidade relativa do ar (a) e precipitação acumulado (b).....	42
Figura 13 - Dados de precipitação relacionado ao mês.....	47

Figura 14 - Relação entre dados de evapotranspiração (ET0) estimadas pelo método de Penman-Monteith com medidas coletadas por lisímetros, em escala diária.....	48
Figura 15 - Relação entre dados de evapotranspiração (ET0) estimadas por modelos estatísticos, em escala diária.....	49
Figura 16 - Relação entre valores de ET0 com métodos de estimativas, em escala diária.....	51
Figura 17 - Relação entre valores de ET0 estimadas pelo método de Penman-Monteith com medidas coletadas por lisímetros, em escala diária.....	52
Figura 18 - Relação entre dados de evapotranspiração (ET0) estimadas pelo método de Penman-Monteith com medidas coletadas por lisímetros, em escala semanal.....	54
Figura 19 - Relação entre dados de evapotranspiração (ET0) estimada com modelos estatísticos, em escala semanal.....	54
Figura 20 - Relação entre valores de ET0 com métodos de estimativas, em escala semanal.....	55
Figura 21 - Relação entre valores de ET0 com métodos de estimativas e medidas coletadas por lisímetros, em escala semanal.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado dos indicadores estatísticos dos modelos avaliados com a escala diária.....	52
Tabela 2 – Resultado dos indicadores estatísticos dos modelos avaliados com a escala semanal.....	57
Tabela 3 – Resultado dos coeficientes de determinação dos modelos avaliados.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETo	Evapotranspiração de Referência
WMO	World Meteorological Organization
ETp	Evapotranspiração Potencial
T	Temperatura
Tmj	Temperatura Média do Mês
Ta	Temperatura Média Anual Normal
N	Fotoperíodo do Mês
Ndmês	Dias do Período
Tmed	Temperatura Média do Ar
Tmax	Temperatura Máxima do Ar
Tmin	Temperatura Mínima do Ar
Qo	Irradiância Solar no Topo da Atmosfera
V2	Velocidade do Vento a 2 Metros de Altura
G	Fluxo de Calor
Cor	Correção
S	Declividade
Ea	Pressão Real de Vapor D'água na Atmosfera
Es	Pressão de Saturação de Vapor D'água na Atmosfera
Kt	Transmissividade Atmosférica
Rn	Radiação Líquida Total Diária
Rns	Radiação Solar de Onda Curta
Rnl	Radiação de Onda Longa
Rs	Radiação Solar Global
Ra	Irradiância Solar no Topo da Atmosfera
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
FAO	Organização das Nações Unidas
γ	Constante Psicrométrica
MBE	Mean Bias Error
RMSE	Root Mean Square Error
R ²	Coeficiente de Determinação

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
kPa	Kilopascal
μm	Micrômetro
mm	Milímetros
°C	Graus Celsius
m/s	Metros por Segundo
MJ	MegaJoule

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	25
2.1	Estação meteorológica e de lisimetria.....	25
2.2	Medidas Meteorológicas.....	26
2.2.1	Temperatura do ar.....	26
2.2.2	Umidade relativa do ar.....	27
2.2.3	Velocidade do vento.....	28
2.2.4	Precipitação.....	29
2.2.5	Radiação solar.....	30
2.2.6	Evapotranspiração.....	31
2.3	Lisímetros.....	32
2.3.1	Lisímetro de Drenagem.....	32
2.3.2	Lisímetro de Pesagem.....	33
2.3.3	Lisímetro de Lençol Freático Constante.....	34
2.4	Modelos de Evapotranspiração.....	37
2.4.1	Método de Thornthwaite.....	37
2.4.2	Método de Camargo.....	39
2.4.3	Método de Penman Monteith.....	39
2.4.4	Método de Hargreaves e Samani.....	40
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1	Localização e clima.....	41
3.2	Método comparativo de referência: Penman-Monteith.....	42
3.3	Dados Analisados.....	45
3.4	Indicadores Estatísticos.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5	CONCLUSÕES.....	59
6	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Apesar de Aristóteles, através de sua obra “Meteorológica” (340 a.C.), ter sido o primeiro a cunhar o termo e divulgar seus estudos com base em meteorologia, o pai da meteorologia não foi o primeiro a ter observado as particularidades relacionadas ao clima. Povos muito mais antigos já apresentavam conceitos e noções rudimentares de meteorologia e com base na observação dos astros já se arriscavam a realizar previsões deste, podendo citar os egípcios que já apresentavam a capacidade de prever as estações e prever as cheias do rio Nilo. Desde então as particularidades climatológicas tomaram cada vez mais enfoque devido a seu alto grau de importância e seu estudo tornou-se indispensável. Alterações meteorológicas afetam diretamente a forma como os seres humanos vivem e interagem com o meio, indicativos de qualidade do ar, quantidade de umidade, índices pluviométricos, índices de radiação, etc, possuem a devida importância quando relacionamos estes ao cultivo, ao uso de recursos hídricos, a agropecuária, etc (YNOUE et al., 2017; REIS; LOPES; OLIVEIRA; 2015; SOUZA; GALVANI; ASSUNÇÃO, 2003).

A água é de grande importância ecológica, econômica e social. A escassez dos recursos hídricos, juntamente com o elevado custo de energia e ao múltiplo uso da água, faz-se necessário utilizar metodologias mais apropriadas ao manejo racional da água. A utilização da água para a produção agrícola necessita de um planejamento eficiente, bem como no momento da irrigação, afinal o setor agrícola é responsável por boa parte do seu consumo. Com isso, pode-se alcançar uma melhor eficiência do solo, maior segurança em períodos de secas e melhorando a produtividade da respectiva cultura. Com esse intuito, realizar o acompanhamento de variáveis meteorológicas se torna fundamental, já que possuem grande influência na produção.

Somente no século XV temos o surgimento dos primeiros instrumentos de análise meteorológica. Nessa época tem-se o surgimento de pluviômetros, anemômetros oscilantes, barômetros e termoscópios, equipamentos esses presentes nas principais estações meteorológicas até os dias de hoje. Com o avanço da tecnologia e aperfeiçoamento das técnicas empregadas em análise climática, têm-se o surgimento de estações meteorológicas comuns, compostas por instrumentos que coletam uma ampla gama de variáveis atmosféricas, como pressão atmosférica, temperatura e umidade do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento e posteriormente tem-se o surgimento de estações automatizadas, que através

de sensores e medição automática facilitam a coleta e o acesso de dados climáticos em tempo real (CARVALHO, 2019).

Outra medida fundamental é a de evapotranspiração, caracterizado por se tratar de um processo simultâneo de transferência da água contida no solo, vegetação úmida e através do processo de transpiração das plantas, para a atmosfera em forma de vapor (PEREIRA et al., 1997). Sendo de extrema importância para o ciclo hidrológico e pode ser determinada através de modelos matemáticos de estimativa, lisímetros, evaporímetros e balanço de energia (TAGLIAFERRE et al., 2010).

Os modelos matemáticos são utilizados pela maioria das estações meteorológicas, pois não apresentam equipamentos responsáveis pelo fornecimento da evapotranspiração. Estes modelos se enquadram Thornthwaite, Hargreaves e Samani, Priestley-Taylor, Penman-Monteith e entre outros. O Método de Penman-Monteith apresenta maior número de variáveis e conseqüentemente maior precisão, é o mais utilizado e recomendado, se houver em sua estação a presença de todas as medidas contidas em sua fórmula, porém, para o seu cálculo, se é utilizado uma equação na qual foi definida para a região dos Estados Unidos (radiação de onda longa), podendo ocasionar algumas influências finais nos cálculos.

Outra forma de se obter a evapotranspiração são pelos lisímetros. São equipamentos que necessitam ser construídos em um local apropriado para iniciar ser aferimento da medida. Os lisímetros que são encontrados mais facilmente pelas estações de lisimetria são: Lisímetro de drenagem, Lisímetro de pesagem e o Lisímetro de lençol freático constante, na qual para este experimento foi utilizado medidas aferidas pelos lisímetros de pesagem e lençol freático no ano de 2017, que foi passado por um processo de reforma no atual ano.

O maior problema contido nessas medidas é perante sua confiabilidade. Dados como esses são de grande importância e, necessitam estar validados e seguros para usos futuros. Para manter essa segurança é necessário criar estratégias que auxiliam na medição destes equipamentos, como por exemplo em casos de períodos onde ocorre um grande aumento na precipitação, sendo preciso ter uma válvula de escape para que a água em excesso não comprometa a medição.

Assim o presente estudo teve como objetivo promover uma validação dos dados obtidos pelos lisímetros presentes na Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP) – Botucatu – SP, juntamente com o método de estimativa Penman-Monteith, através de indicadores estatísticos presentes na literatura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estação Meteorológica e de Lisimetria

Com o avanço da tecnologia e o aumento do estudo sobre o clima, tem se tornado necessário equipamentos que fornecem medidas meteorológicas confiáveis. Uma estação meteorológica é constituída por equipamentos que medem as possíveis variáveis da atmosfera, sendo essas, pressão, umidade relativa do ar, precipitação, temperatura do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento. Podendo ser estações mecânicas ou ainda se tratar de estações automatizadas, que fazem o uso de equipamentos eletrônicos para a medição dos dados.

Medidas concebidas pelas estações ao longo do tempo, permitem identificar características do clima de alguma localidade, assim, permitindo um melhor monitoramento de condições climáticas da região, auxiliando agricultores no seu dia a dia e possibilitando uma melhor precisão no planejamento agrícola (VAREJÃO-SILVA, 2006; YNOUE et al., 2017).

Uma estação de lisimetria é constituída por equipamentos capazes de aferir a evapotranspiração, chamados de lisímetros (DOORENBOS; PRUIT, 1977; DOORENBOS; KASSAM, 1979; ALLEN et al., 1998). Entre eles são, os lisímetros de pesagem, lençol freático constante e drenagem. Estes equipamentos fornecem medidas de evapotranspiração e estas são de grande importância para melhorar os sistemas de irrigação e atender a demanda hídrica das culturas agrícolas, além de auxiliar em estudos, de uma determinada região, com o ajuste da estimativa de evapotranspiração de referência (ET_0).

Para o aferimento das medidas, os lisímetros são construídos em meio a um solo, isolado hidrológicamente, assim conseguindo captar as medidas dos fatores influentes no balanço de energia em relação a massa da água (PUPPO, GARCÍA-PETILLO, 2010).

2.2 Medidas Meteorológicas

2.2.1 Temperatura do Ar

A temperatura trata-se de uma grandeza física escalar, essa que mede o grau de agitação das moléculas presentes em um corpo ou em uma superfície, de modo que, quanto maior o grau de agitação molecular maior será a temperatura obtida. Para estimarmos a temperatura faz-se o uso de equipamentos específicos para tal, como por exemplo termômetros, que medem a temperatura de superfícies (°C), termógrafos que registram a temperatura do ar (°C) ou termohigrógrafos que, além de marcarem a temperatura em °C ainda possuem a capacidade de medir a porcentagem de umidade presente no ar (VAREJÃO-SILVA, 2006; STRASSBURGER et al., 2011; (MONTEIRO et al., [s.d.])).

Para realizar a montagem de equipamentos que aferem a temperatura do ar à superfície, é necessário seguir um padrão definido pela organização meteorológica mundial (WMO), onde as observações da temperatura do ar devem ser realizadas dentro de um abrigo meteorológico, sendo ele convencional (Figura 1a) ou automatizado (Figura 1b) e precisam estar entre 1,5 e 2,0 metros de altura acima do nível do solo (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; VAREJÃO-SILVA, 2006).

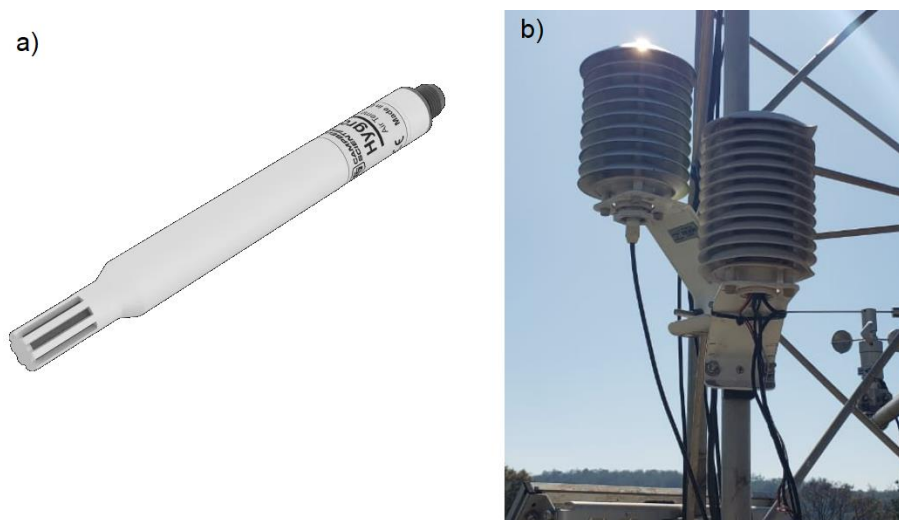
Figura 1 – Abrigo Convencional e Automatizado da Estação Meteorológica da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como toda medida em climatologia, a temperatura possui ciclos em condições normais, tendo seu maior pico no período da tarde (temperatura máxima registrada) e o menor antes do nascer do sol (temperatura mínima registrada), se não houver influência de determinados fenômenos (VAREJÃO-SILVA, 2006). Com isso, estações convencionais para aferirem a temperatura do ar durante o dia, possuem um termômetro de máxima e outro de mínima. Estações automatizadas auxiliam na fase de medição dos dados, pois usam equipamentos eletrônicos para registrar a temperatura de forma automática, fazendo com que seja possível obter um maior número de registros em um período. Para o sensor (Figura 2a) aferir a temperatura de modo correto é necessário a presença de um abrigo meteorológico específico, presente na Figura 2b.

Figura 2 – Sensor de temperatura presente na estação meteorológica automatizada da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo



Fonte: a) Campbell Scientific (2022) e b) Elaborado pelo autor (2022).

2.2.2 Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa do ar trata-se de uma relação existente entre a quantidade de água presente na atmosfera em forma de vapor sem que ocorra precipitação e o ponto de saturação desta. Possui forte relação com o ciclo hidrológico, pois devido ao processo de evaporação de superfícies, através da qual a água presente no estado líquido, passa para o estado gasoso e ao processo de transpiração realizado por plantas (perda de água e forma de vapor através da transpiração e perda de água na

forma líquida através da gutação) e animais, tem -se a transferência do vapor de água para a atmosfera (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Podendo apresentar variações devido a alterações da temperatura e também devido ao tipo de cobertura vegetal do solo, é uma das análises principais observadas em estações meteorológicas, por meio de aparelhos como higrômetros, termo-higrômetros e psicrômetros pode-se aferir a variação dessa e também realizar previsões com relação ao tempo (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Como apresentado na Figura 2, o sensor é também capaz de aferir a umidade relativa presente no ar.

2.2.3 Velocidade do Vento

A caracterização do vento se dá por meio de deslocamentos horizontais de uma massa de ar, ocorrendo sempre de uma área de maior pressão atmosférica para uma área de menor. E que por meio de seu deslocamento acabam transportando consigo características (temperatura e precipitação) do seu local de origem. Sua direção e velocidade são quantificadas através de variações das condições presentes na atmosfera, sendo esses temporais e espaciais, está apresentando uma estreita correlação com o relevo, pois quanto mais acidentado for o relevo menor será a velocidade do vento nesse local enquanto que em áreas pouco acidentadas essa velocidade será maior (VAREJÃO-SILVA, 2006; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA 2007; YNOUE, 2017).

Sendo um dos fatores que influencia na evapotranspiração, sua quantificação de velocidade e direção, pode ser medida em metros por segundo, quilômetros por hora, ou em nós, por meio de um anemômetro (Figura 3). Instrumento este composto por três ou quatro conchas móveis, que realizam movimento circular e que de maneira analógica ou digital determinam a velocidade do vento, por meio da quantidade de rotação destas (VAREJÃO-SILVA, 2006; YNOUE, 2017).

Figura 3 – Anemômetro presente na estação meteorológica automatizada da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

2.2.4 Precipitação

Em sua grande maioria a água presente na atmosfera encontra-se em forma de vapor, este sendo derivado dos processos de evapotranspiração. Entretanto há um limite de vapor d'água que o ar suporta sem que ocorra condensação, a concentração de saturação, esse limite varia de acordo com a temperatura pois quanto maior a temperatura maior a quantidade de água que o ar suporta sem que ocorra sua condensação. Quando essa quantidade é ultrapassada, tem-se a formação de gotículas de água que permanecem em suspensão devido as correntes de ar ascendentes e quando estas crescem e atingem determinado tamanho e peso que superam essas correntes, tem-se a precipitação da água na superfície terrestre, em forma de chuva (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

A mensuração da precipitação é indispensável devido ao seu alto grau de importância, essa possui um papel crucial no balanço hídrico devido a ser a única forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica, para tanto são utilizados equipamentos chamados de pluviômetros, que registram o volume precipitado em milímetros (COLLISCHONN; TASSI, 2008; YNOUE, 2017).

Os pluviômetros basculantes (Figura 4) ou também conhecidos como sendo automáticos, são instrumentos capazes de medir a precipitação. Isso é possível por realizarem o registro do volume de água captado juntamente com o auxílio de equipamentos eletrônicos, permitindo assim, o aferimento de medidas em escalas sub-horárias.

Figura 4 – Pluviômetro presente na estação meteorológica automatizada da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

2.2.5 Radiação Solar

A radiação ou energia radiante, trata-se de uma onda energética que se propaga sem a necessidade de um meio de propagação. Para a meteorologia o estudo desta e do saldo de radiação é fundamental, pois interfere diretamente em algumas medidas como no cálculo da evapotranspiração e no cálculo do balanço hídrico.

Por definição o saldo de radiação é um balanço global da radiação, sendo contabilizados o balanço das ondas curtas (0,3 a 2,8 μm) contabilizadas por meio da diferença entre a radiação global incidente e refletida e longas (superiores a 4 μm) dadas através do cálculo da diferença da radiação atmosférica e terrestre. Este representa a quantidade de energia disponível em um determinado ambiente

expressando uma dependência temporal e espacial, pois fatores como tipo de cobertura vegetal, albedo, umidade do ar e a temperatura do solo podem influenciar diretamente neste. Para tanto faz-se o uso de instrumentos denominados de radiômetros (Figura 5), que são capazes de estimar a radiação eletromagnética e também detectar o comprimento de onda (AGUIAR, 2007; FLUMIGNAN et al., 2018; SENTELHAS; NASCIMENTO, 2003).

Figura 5 – Radiômetro CNR1 presente na estação de radiometria solar da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

2.2.6 Evapotranspiração

Nos últimos anos, a evapotranspiração ganhou importância crescente. A modelagem da evapotranspiração é a base para a construção de sistemas que podem ser utilizados praticamente em qualquer ambiente. Estes estão sendo monitorados quanto ao fluxo de água no sistema, assim como plantas e até modelos de irrigação.

A evapotranspiração (ET₀) é o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por meio da evaporação da água contida no solo e na vegetação úmida e pela transpiração das plantas, ou seja, é a perda conjuntiva da água da planta e do solo para a atmosfera no estado de vapor (PEREIRA et al., 1997). Tendo um papel importantíssimo no Ciclo hidrológico.

Os dados da evapotranspiração são de grande importância para o uso da água em irrigação, uso industrial, para o abastecimento de cidades etc. (JENSEN et al.,

1990; SEDIYAMA, 1998; ALLEN et al., 1998) e contribuem para utilização da água de maneira racional, reduzindo seu consumo e recursos financeiros. Estes podem ser determinados por meio de equipamentos ou por métodos matemáticos. Existem alguns fatores que influenciam a evapotranspiração, são eles os fatores climáticos, fatores da cultura e os fatores ambientais e de manejo (ALLEN et al., 1998). Os fatores climáticos: saldo de radiação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e a pressão atmosférica. Os fatores da cultura: altura, área foliar, tipo de cultura, albedo, profundidade do sistema radicular, rugosidade, capacidade de cobertura do solo e características das raízes. Os fatores ambientais e de manejo: nível de salinidade no solo, fertilidade, presença de camadas impermeáveis, densidade de plantio, impedimentos físicos, incidências de pragas e conteúdo de água no solo.

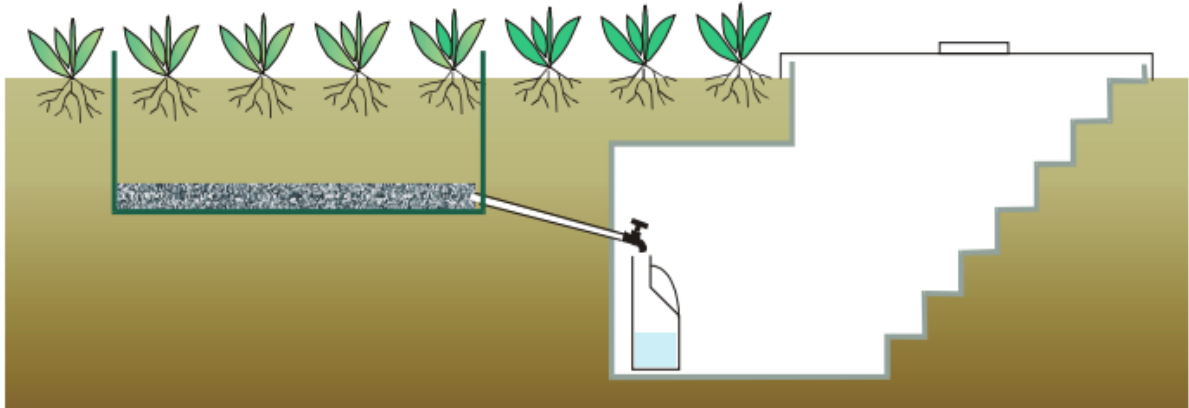
2.3 Lisímetros

2.3.1 Lisímetro de Drenagem

Para a construção de um lisímetro de drenagem é necessário escavar as laterais de uma maneira sistematizada. A primeira trincheira a ser feita é considerada como um dos lados externos do monólito. Uma chapa de metal é inserida verticalmente em uma pequena angulação entre 1 a 5° a uma profundidade entre 0,6 a 1,0 m. A segunda trincheira, que é feita em ângulo com a primeira, é a segunda lateral do monólito. Esta lateral é recoberta com um filme plástico sendo colocada a chapa de metal e na superfície do monólito um molde plástico interligado ao filme que foi enterrado para a prevenção do escoamento superficial. Um dreno é conectado a chapa de metal para a coleta da água drenada (PELLISON, 2018).

O lisímetro de drenagem, mostrado na Figura 6, possibilita a medição da evapotranspiração por meio da diferença da quantidade de água administrada no tanque superior e percolada para a área inferior, onde será escoada por infiltração. Este lisímetro, além de aferir a evapotranspiração, possui outras funcionalidades e é considerado relativamente lento, em comparação aos outros evapotranspirômetros. Possui uma melhor precisão em períodos longos (mínimo de cinco dias a uma semana).

Figura 6 – Lisímetro de drenagem



Fonte: Varejão-Silva (2017).

2.3.2 Lisímetro de Pesagem

O lisímetro de pesagem (Figura 7) é capaz de determinar a evapotranspiração por meio da variação do peso em um bloco de solo, esta variação está ligada a entrada e saída de água do tanque (CAMPECHE et al., 2011). Para obter o peso do tanque é utilizado uma balança de carga sob ele (Figura 8), permitindo assim uma maior precisão, quando utilizados para medir em períodos curtos, além de permitir acompanhar a taxa evapotranspiratória em função do potencial da água do solo, da incidência de energia e da hora do dia (VAREJÃO-SILVA, 2017). O coeficiente de cultivo é considerado como determinação padrão.

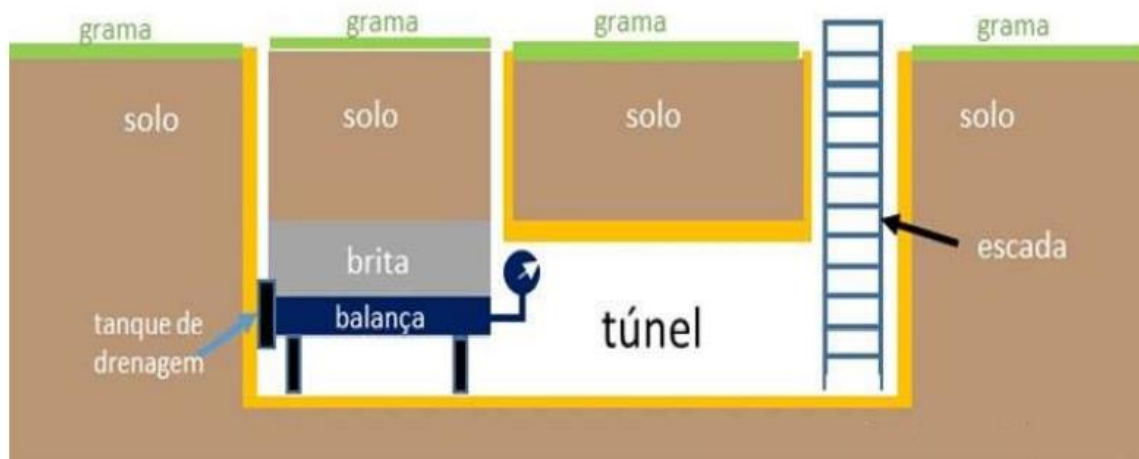
Para realizar a manutenção desse equipamento é necessário realizar o ajuste da sensibilidade das células de carga, assim obtendo uma maior precisão na variação da massa do sistema e, conseqüentemente, uma medida mais precisa e válida.

Figura 7 – Lisímetro de pesagem presente na estação de lisimetria da Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Funcionamento do lisímetro de pesagem



Fonte: Pellison (2018).

2.3.3 Lisímetro de Lençol Freático Constante

O lisímetro de lençol freático constante é capaz de medir a evapotranspiração por meio da diferença do nível de água presente nos tanques. Para o seu

funcionamento é necessário obter um monólito de solo nivelado e ter em seu fundo uma lâmina livre que permanece constante para o reabastecimento de água na cultura. A lâmina de água presente, que está ligada a um sistema de alimentação, contém um tubo para a passagem de água.

Logo acima, possui dois tanques, o tanque intermediário, localizado a 1 metro abaixo do fundo do monólito e, o tanque superior responsável pela carga hidráulica do sistema. Além disso, possui uma boia mecânica que controla a passagem de água enviada ao monólito, caso atinja nível crítico (obtido pelo sensor de nível), a boia com auxílio a uma bomba de recalque, realiza a evacuação da água fazendo com que o excesso presente seja retirado, isso se dá necessário caso haja um período de chuva intenso, não permitindo o acúmulo de água presente no tanque (Figura 11).

A medida, em um lisímetro convencional, é retirada por meio de um medidor presente no tanque superior, onde se faz necessário realizar de modo manual, já em um lisímetro automatizado, a medição é feita por um sensor que controla o nível de água, também no tanque superior, fazendo assim com que as medidas sejam acessadas mais facilmente e de modo remoto.

O lisímetro, cuja as medidas foram utilizadas neste estudo, foi construído e automatizado no ano de 2017 (Figura 9). A Figura 10 apresenta a reforma deste lisímetro sendo incrementado sensores capazes de aferir medidas como o nível de água (sensor ultrassônico e infravermelho) que auxiliam e facilitam na medição e elaboração da evapotranspiração, tornando este processo mais rápido e seguro. Os sensores implantados são resistentes a alta umidade, já que necessitam habitar no tanque superior para medir o nível de água presente.

Figura 9 – Lisímetro de Lençol Freático Constante Antes da Reforma



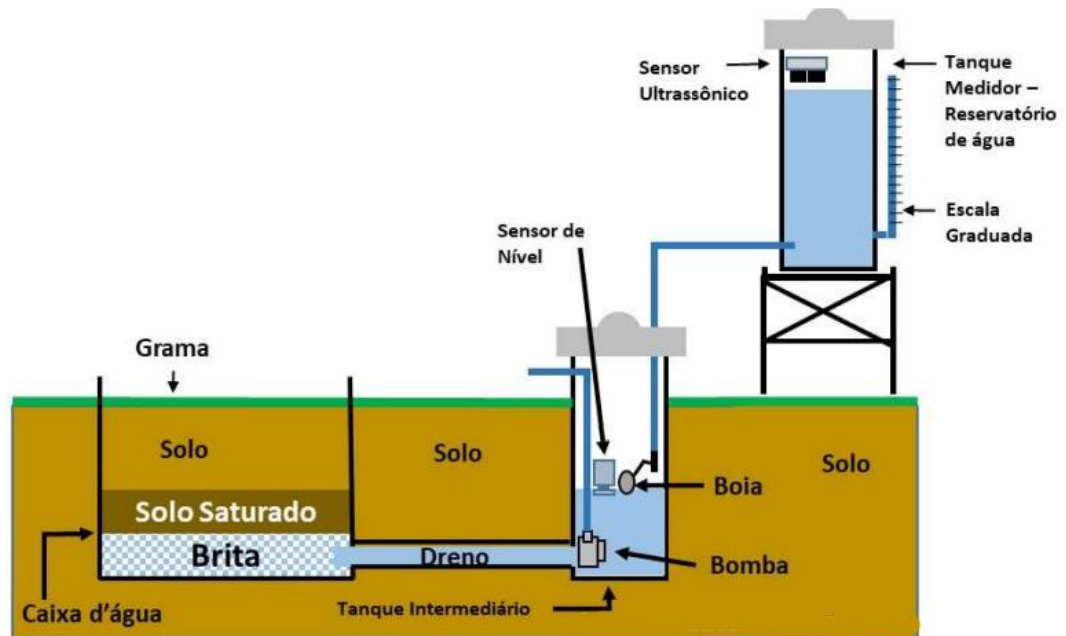
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 10 – Lisímetro de Lençol Freático Constante Presente na Estação de Lisimetria na Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 11 – Funcionamento do lisímetro automatizado de lençol freático constante



Fonte: Pellison (2018).

2.4 Modelos de Evapotranspiração

2.4.1 Método de Thornthwaite

O método de Thornthwaite é um modelo matemático que estima a evapotranspiração potencial mensal, tendo como padrão 30 dias em um mês e um fotoperíodo de 12 horas. Para a estimativa da Evapotranspiração Potencial (ET_p) em regiões de clima úmido, necessita da temperatura média de cada mês, onde: $0 \leq T < 26,50^\circ\text{C}$, conforme a Equação 1:

$$ET_p = 16 \left(\frac{10.T}{I} \right)^a \quad (1)$$

De forma que ET_p é a Evapotranspiração potencial (mm/mês), T a Temperatura média mensal do mês ($^\circ\text{C}$), I o Índice de calor da região e a é o Coeficiente;

Caso a temperatura média mensal do mês for maior ou igual a 26,5°C, a ET_p é dada pela Equação 2.

$$ET_p = -0,4T^2 + 32,24T - 415,85 \quad (2)$$

O parâmetro a pode ser estimado pela Equação 3.

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 0,0179 I + 0,49 \quad (3)$$

O parâmetro I refere-se ao índice calorífico anual e pode ser obtido pela Equação 4.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_{m_i}}{5} \right)^{1,514} \quad (4)$$

Onde o T_{m_i} é a Temperatura média do mês i (°C);

Caso o mês não possua um padrão de 30 dias e um fotoperíodo de 12 horas, é necessário utilizar a correção do método de Thornthwaite (Equação 5).

$$Cor = \frac{Ndmês}{30} \cdot \frac{N}{12} \quad (5)$$

Tendo o N como o fotoperíodo do mês em questão e o $Ndmês$ como os dias do período em questão;

Após calcular seu fator de correção, a equação 6 é utilizada para descobrir a evapotranspiração de referência.

$$ET_0 = ET_p \cdot Cor \quad (6)$$

2.4.2 Método de Camargo

O método de Camargo é um modelo matemático que estima a evapotranspiração potencial mensal utilizando o método de Thornthwaite em versão simplificada (Equação 8).

$$ET_p = 0,01 \cdot Q_0 \cdot T \cdot ND \quad (8)$$

Tendo o Q_0 como sendo a Irradiância solar no topo da atmosfera (mm), o T como a Temperatura média do ar e o ND como o Número de dias do período considerado;

2.4.3 Método de Penman Monteith

É considerado o método mais adequado para estimativas da evapotranspiração de referência pelo fato de se basear em princípios físicos e por levar em consideração todos os fatores climáticos que afetam a evapotranspiração de referência (LEE et al.,2004). A Equação 9 apresenta a fórmula desse método.

$$ET_0 = \frac{0,408.S.(Rn-G) + \frac{\gamma.u_2.900.(e_s - e_a)}{(T+273)}}{\Delta + \gamma.(1+0,34.u_2)} \quad (9)$$

Onde o ET_0 é a Evapotranspiração de referência (mm/dia), Δ é a Declividade da curva de pressão de vapor (kPa), o Rn é a radiação líquida total diária (MJ.m⁻² .d⁻¹), G é o Fluxo de calor no solo (MJ m⁻² .d⁻¹), γ é a constante psicrométrica (0,063 Kpa °C⁻¹), T é a temperatura média diária do ar (°C), u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altura (m/s), e_s é a pressão de saturação de vapor d'água na atmosfera (kPa) e o e_a sendo a pressão real de vapor d'água na atmosfera (kPa).

2.4.4 Método de Hargreaves e Samani

Modelo matemático que estima a evapotranspiração para condições semiáridas (Equação 15).

$$ET_p = 0,0023 \cdot Q_0 \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot (T_{med} + 17,8) \quad (15)$$

Onde o Q_0 é a Irradiância solar no topo da atmosfera, T_{max} é a Temperatura máxima do ar do período considerado ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} é a Temperatura mínima do ar do período considerado ($^{\circ}\text{C}$) e o T_{med} sendo a Temperatura média do ar do período considerado ($^{\circ}\text{C}$).

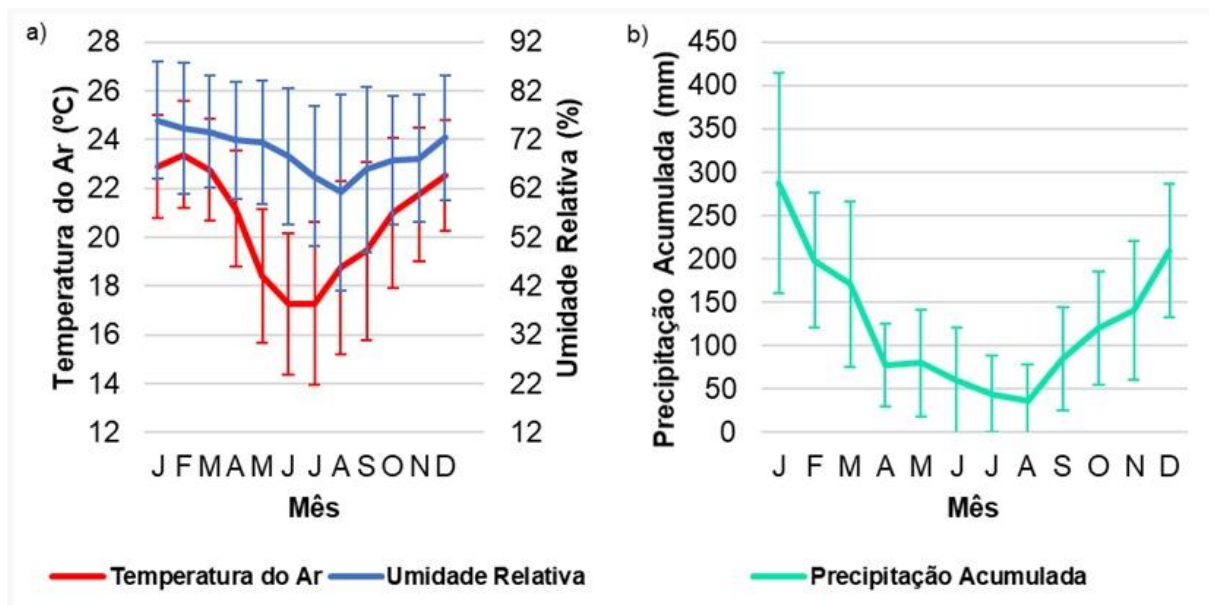
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Clima

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Radiometria Solar e Agrometeorologia do Departamento de Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” (UNESP), Campus Botucatu – SP. Sendo a altitude 786m, 22°51'S de latitude e 48°26'W de longitude. Localizada na região centro-sul do estado de São Paulo, Botucatu possui clima temperado quente com invernos secos no período de julho a agosto e de quente e úmido de dezembro a fevereiro. Com uma população crescente de 1,07% ao ano, Botucatu, no ano de 2021, estima-se 149 mil habitantes e uma área territorial de aproximadamente 1.482,642 km². Possui como principal atividade a agropecuária, o cultivo da cana-de-açúcar e eucalipto, tendo como bioma Cerrado e Mata Atlântica (IBGE, 2022; DAL PAI et al., 2016; ROSSI, et al., 2018).

A série histórica (Figura 12), composta pela comparação das medidas de umidade relativa e temperatura do ar (Figura 12a) e pela precipitação (Figura 12b) em relação aos meses no decorrer do ano de 2017, foi aferida pela Estação Meteorológica do Lageado (2022), com o intuito de caracterizar os padrões das variáveis em Botucatu. Nos gráficos, quando relacionamos a temperatura média de cada mês, conta que a temperatura apresentou um valor menor nos meses de junho e julho (aproximadamente 17°C) e maior no mês de fevereiro (aproximadamente 23°C), sendo que o mês que possuiu maior índice pluviométrico foi o de janeiro (aproximadamente 300 mm) e agosto com o menor (aproximadamente 50 mm). Por estes fatos, o mês mais úmido foi o que apresentou uma maior precipitação, que foi o mês de janeiro (aproximadamente 76%) e o mês de agosto, com o menor índice de precipitação, apresentou uma menor umidade relativa (aproximadamente 62%).

Figura 12 – Série histórica de dados climáticos (1971 a 2013), contendo a temperatura média e umidade relativa do ar (a) e precipitação acumulada (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.2 Método comparativo de referência: Penman-Monteith

Para a realização do estudo comparativo entre os diferentes métodos de medidas da evapotranspiração, foram utilizados os seguintes dados meteorológicos: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação e radiação solar. Para a medida da temperatura do ar e umidade relativa do ar foi utilizado um Termohigrômetro modelo HC2S3 – Campbell Scientific, INC; para a medida da precipitação foi utilizado um pluviômetro basculante modelo TB4 Rain Gage Campbell Scientific, INC; para a medida da velocidade do vento foi utilizado um anemômetro de concha modelo MET One 034B Wind Set – Campbell Scientific, INC; e para a medida da radiação solar global foi utilizado um piranômetro Eppley modelo PSP. Os dados utilizados foram do período do ano de 2017 na partição de tempo diária.

Para a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman Monteith, foram utilizadas as seguintes equações:

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (16)$$

$$UR_{max} = 100 \frac{e_{a_{max}}}{e^0(T_{min})} \quad (17)$$

$$UR_{min} = 100 \frac{e_{a_{min}}}{e^0(T_{max})} \quad (18)$$

$$e^0(T) = 0.6108 \left[\frac{17.27 T}{T+237.3} \right] \quad (19)$$

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) \frac{UR_{max}}{100} + e^0(T_{max}) \frac{UR_{min}}{100}}{2} \quad (20)$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (21)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T}{T+237.3}\right) \right]}{(T+237.3)^2} \quad (22)$$

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (23)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (24)$$

$$R_{nl} = -\sigma \left[\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (25)$$

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a \quad (26)$$

Onde o T se refere a temperatura média; o Tmax é a temperatura máxima; Tmin é a temperatura média; $UR_{máx}$ é a umidade relativa máxima; UR_{min} é a umidade relativa mínima; $e_{a_{máx}}$ é a saturação máxima; $e_{a_{min}}$ é a saturação mínima; e^0 é a pressão de vapor de saturação na temperatura do ar; e_a é a pressão de vapor atual; e_s é a pressão média de saturação; Δ é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação (exp se refere a 2.7183 (base do logaritmo natural) elevado a potência [...]); R_n é a radiação líquida total diária; R_{ns} se refere a radiação solar de onda curta, R_{nl} é a radiação de onda longa; α é o albedo (0.23); R_s é a radiação solar global; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4.903 \cdot 10^{-9}$); e_a é a pressão de vapor atual; R_{s0} é a radiação solar nas condições de céu aberto; $a_s + b_s$ é a fração de radiação extraterrestre que atinge a terra em dias de céu aberto ($a = 0.25$ e $b = 0.50$); e R_a é a irradiância solar no topo da atmosfera.

Em relação a Radiação de onda longa da atmosfera à superfície terrestre, diferentes fórmulas têm sido propostas para estimá-la (Ångström, 1918; Brunt, 1932; Elsasser, 1942; Swinbank, 1963; Idso e Jackson, 1969; Brutsaert, 1975 e Satterlund, 1979). Para realizar as estimativas da radiação se utilizam valores de temperatura do ar e pressão de vapor ou do ponto de orvalho, sendo utilizados métodos empíricos e analíticos (Prata, 1996). A grande diferença entre estes métodos é devido a derivação de uma base física, enquanto os últimos são obtidos a partir de correlações empíricas.

O modelo proposto por Allen em 1998, referente a equação 25, é uma adaptação da equação de Brunt, na qual foi elaborada em 1932, e modificada por Penman-Monteith em 1998 (ALLEN et al., 1998). Segundo o manual da FAO 56, a taxa de emissão de energia de ondas longas é proporcional à temperatura absoluta da superfície elevado à quarta potência, como pode ser observado na equação já mencionada. A lei de Stefan-Boltzmann expressa quantitativamente esta relação. O fluxo líquido de energia que deixa a superfície da Terra é menor do que o emitido e dado pela lei de Stefan-Boltzmann devido à absorção e radiação descendente do céu. O vapor de água, nuvens, dióxido de carbono e poeira são absorvedores e emissores de ondas longas radiação e suas concentrações devem ser conhecidas ao avaliar o fluxo líquido de saída. A umidade e nebulosidade desempenham um papel importante, a lei de Stefan-Boltzmann é corrigida por estes dois fatores ao estimar o fluxo líquido de saída de radiação de onda longa.

3.3 Dados Analisados

Para o seguinte estudo foram utilizados dados de junho a dezembro do ano de 2017, período este que compreende as medidas concomitantes dos lisímetros de lençol freático e de pesagem. Para o cálculo dos modelos de estimativa, foram utilizados os dados meteorológicos do mesmo período fornecidos pela Estação Agrometeorológica da FCA/UNESP/Botucatu.

Com o intuito de analisar as medidas aferidas pelos lisímetros e pelas medidas oriundas dos modelos matemáticos, sendo eles: modelo de Hargreaves-Samani, modelo de Thornthwaite e modelo de Camargo, comparadas com valores estimados pelo método de Penman-Monteith, foi realizado, por meio de uma série de comparações entre os valores obtidas pelos modelos relacionados aos valores estimados pelo método de Penman-Monteith. Para estas comparações, dados de mesmo período estimados por modelos diferentes são relacionados as estimativas de Penman, estas comparações determinam, por meio de uma regressão linear simples, seus respectivos coeficientes angulares, demonstrando se seus valores apresentaram superestimativas ou subestimativas, e seus coeficientes de determinação podendo identificar as relações dos valores médios dos modelos comparados.

Em termos práticos, para aplicações em agronomia, é usual a utilização de intervalos de tempo maiores que um dia, visto os processos fisiológicos da planta. Dessa forma, é comum a utilização de partições de tempo de 7 dias (semanal), 10 dias (decêndio) e até 15 dias (quinzenais) para aplicações agronômicas. Nesse sentido, para realizar as comparações, foi dividido em duas partições, sendo elas a diária e semanal. Com isso se iniciaram o processo de comparação e validação dos dados para a partição diária, logo após, os dados foram agrupados em intervalos de 7 dias, num total de 4 ocorrências por mês, sendo refeito todas as comparações com a partição semanal.

3.4 Indicadores Estatísticos

A análise estatística das medidas colhidas pelos lisímetros junto com os dados estimados pela equação de Penman Monteith foi exercida utilizando os indicadores estatísticos MBE (“*Mean Bias Error*”) e RMSE (“*Root Mean Square Error*”). (STONE, 1993; DAL PAI et al., 2014; KHAN et al., 2018). O indicador estatístico MBE (Equação

16) quantifica a diferença entre os pares de dados, comparando-os com o intuito de identificar tendências significativas, apontando superestimativas ou subestimativas entre os valores. O indicador estatístico RMSE (Equação 17) estima o erro absoluto indicado pelas diferenças entre os pares de dados avaliados, indicando, com maior intensidade, grandes erros.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ET_{est} - ET_{obs}) \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (ET_{est} - ET_{obs})^2}{N}} \quad (17)$$

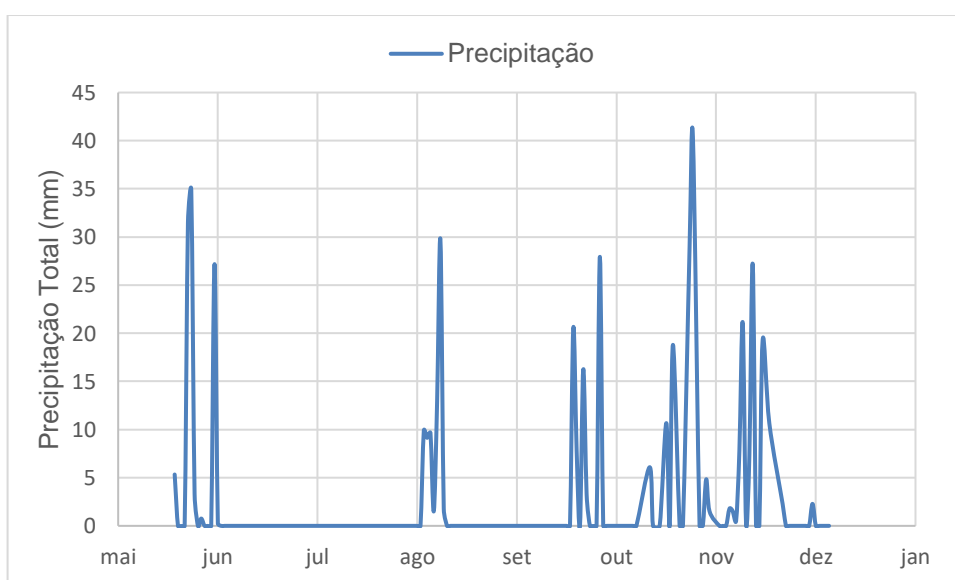
De forma que MBE é o *Mean Bias Error*, RSME é o *Root Mean Square Error*, ET_{est} são os valores a serem testados, ET_{obs} são os valores medidos no local e N são os números de pares de observações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos usados no presente estudo foram os modelos de Penman-Monteith, modelo de Hargreaves-Samani, modelo de Camargo e modelo de Thornthwaite. O modelo de Penman-Monteith foi utilizado como modelo de referência, de acordo com recomendação do manual Fao-56 (Allen et al., 1998). Os modelos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani foram desenvolvidos para a partição de tempo diária, enquanto que os modelos de Camargo e Thornthwaite foram desenvolvidos para a partição de tempo mensal. Tanto os modelos de Hargreaves & Samani, Camargo e Thornthwaite, como os dados medidos pelos lisímetros de lençol freático e pesagem, todos foram comparados com o modelo de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

A Figura 13 mostra a precipitação ocorrida no período considerado para o estudo, visto que esta variável meteorológica tem impacto direto nos valores da evapotranspiração, principalmente nos dados medidos pelos lisímetros. Estudos da literatura apontam a dificuldade da correta mensuração da evapotranspiração quando da ocorrência da precipitação (PEREIRA et al., 1997). De acordo com a Figura 13, pode-se observar que houve picos de precipitação nos meses de junho, agosto, final de setembro. Já em novembro foi o mês com mais dias com eventos de precipitação.

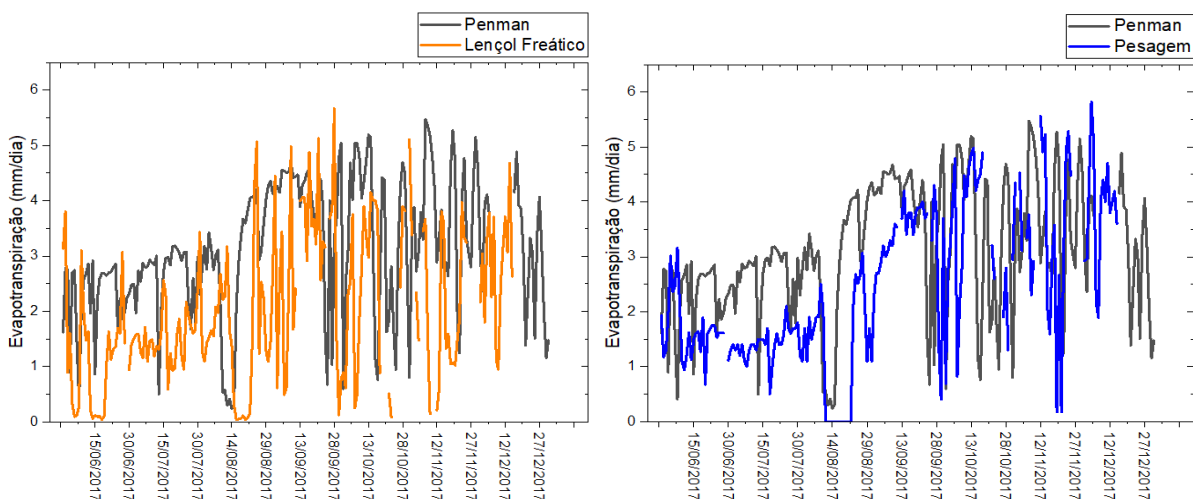
Figura 13 – Dados de precipitação relacionado ao mês



A Figura 14 mostra a comparação entre os dados dos lisímetros de lençol freático (Figura 14a) e de pesagem (Figura 14b) com os valores obtidos pelo método de Penman-Monteith. Observou-se grande flutuação dos valores de evapotranspiração medidos pelos lisímetros para os períodos de precipitação (junho, agosto e novembro), com diferenças de 3 mm no mês de junho a 5 mm no mês de novembro.

Já a comparação entre os dados do lisímetro de pesagem com os valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith, apesar da oscilação causada pelo efeito da precipitação, mostrou um comportamento mais uniforme, com valores mais próximos. Verificou-se também que para ambos os lisímetros, suas medidas, na média, foram menores que aqueles valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith. Possivelmente essa superestimativa verificada pela aplicação do modelo de Penman-Monteith esteja ligada na estimativa de onda longa, a qual foi parametrizada para condições climáticas diferentes das condições em Botucatu (Gomes Junior, 2020).

Figura 14 – Relação entre dados de evapotranspiração (ET₀) estimadas pelo método de Penman Monteith com medidas coletadas por lisímetros, em escala diária

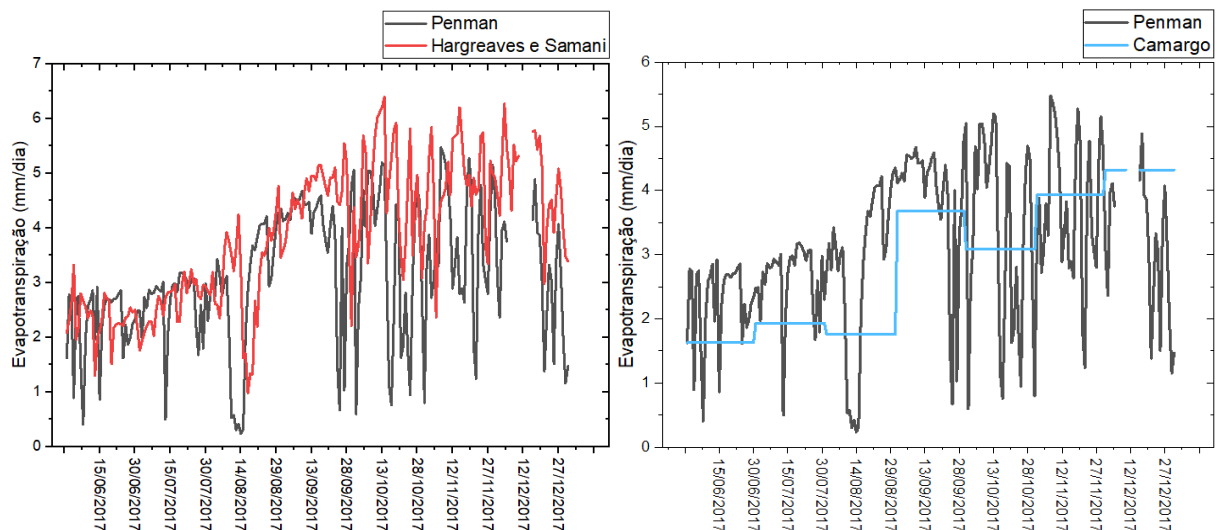


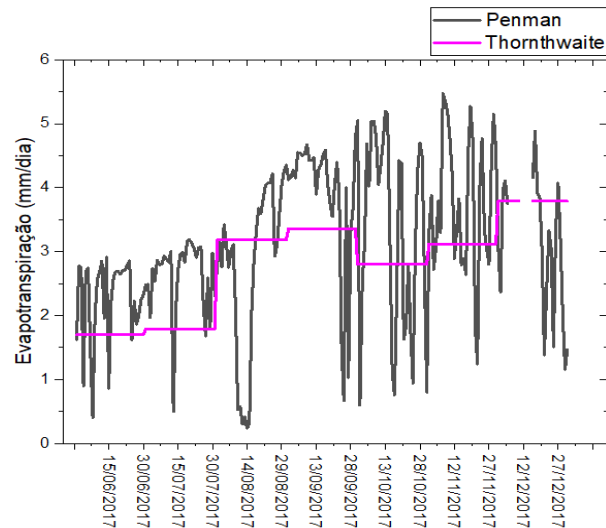
O modelo de Penman-Monteith, por utilizar em seu equacionamento as variáveis meteorológicas radiação global, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, não apresenta sensibilidade para eventos de precipitação, o que não é o

caso dos lisímetros, o que pode justificar a grande oscilação dos valores entre os lisímetros e as estimativas pelo modelo de Penman-Monteith.

Já a Figura 15 mostra a comparação dos modelos de estimativa de evapotranspiração de Hargreaves & Samani (Figura 15a), modelo de Camargo (Figura 15b) e modelo de Thornthwaite (Figura 15c) com os valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith. Observou-se, portanto, que os dados estimados pelos modelos de Hargreaves & Samani, quando comparados a Penman Monteith, apresenta uma menor disparidade. Este método foi desenvolvido para condições semi-áridas e, portanto, produz superestimativas em relação ao método de referência. Já os métodos de Camargo e Thornthwaite foram desenvolvidos para escala de tempo mensal e, neste estudo, foram aplicados na escala diária para verificação de seu desempenho. A importância desses modelos está no uso de poucas variáveis meteorológicas nas estimativas, sendo estas variáveis de fácil acesso.

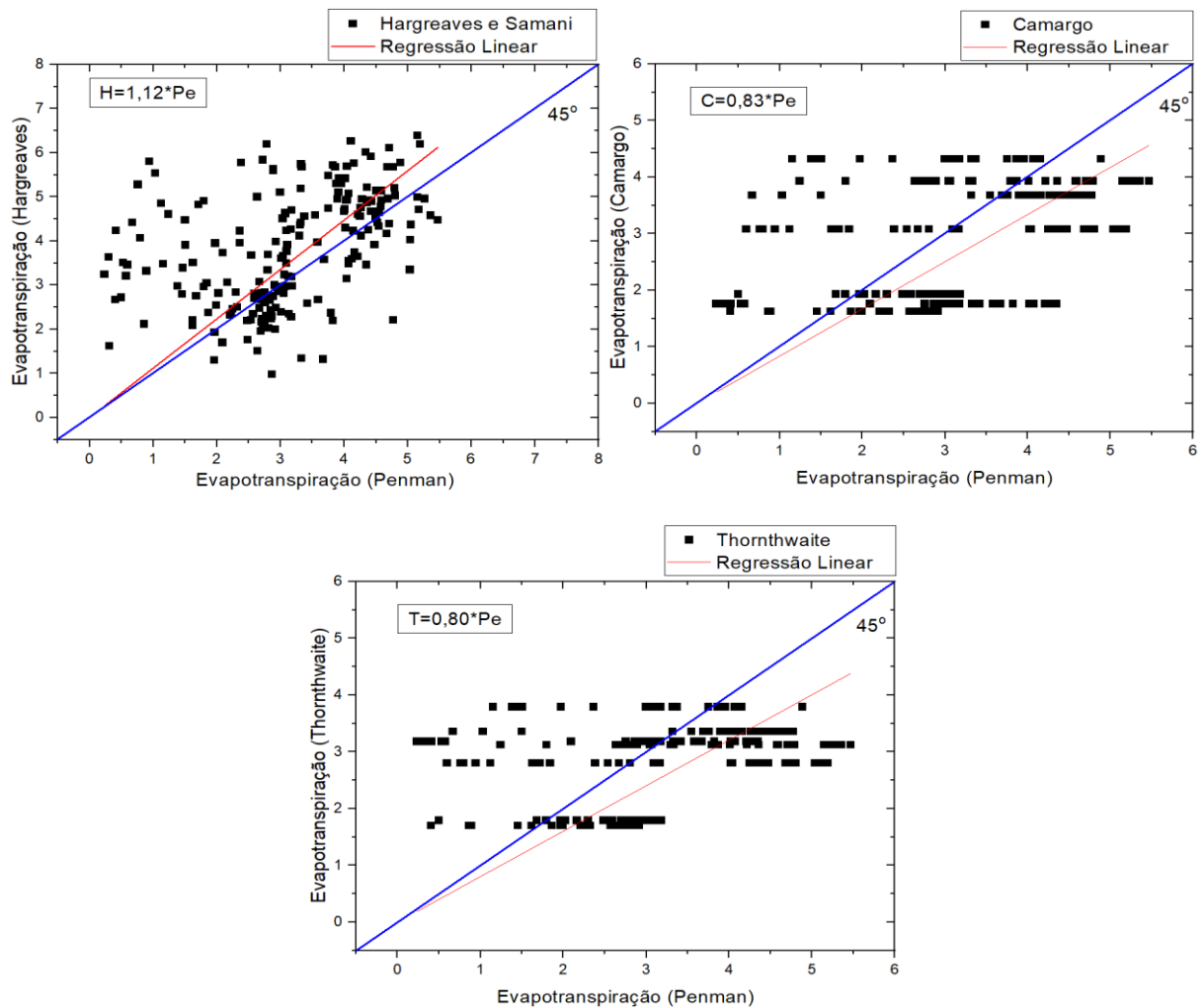
Figura 15 – Relação entre dados de evapotranspiração (ET₀) estimadas por modelos estatísticos, em escala diária





Para um melhor entendimento, foi realizada uma análise por meio da comparação entre os resultados dos diversos modelos calculados e dos dados medidos por meio de uma regressão linear simples. A Figura 16 apresenta o resultado da regressão entre os modelos matemáticos, assumindo como referência Penman-Monteith. Inicialmente foi possível observar, em relação a Hargreaves & Samani com Penman-Monteith (Figura 16a), uma maior dispersão dos valores, contendo um coeficiente angular maior que 1 (1,12), ou seja, estimativas pelo modelo de Hargreaves-Samani superestimam os valores encontrados pelo modelo de Penman-Monteith. Já os modelos de Camargo e Thornthwaite foram encontradas subestimativas em relação ao modelo de Penman-Monteith, com valores de coeficiente angular de 0,83 e 0,80, respectivamente. Por se tratarem de modelos desenvolvidos para partição de tempo média-mensal, os resultados foram satisfatórios quando aplicados na partição de tempo diária.

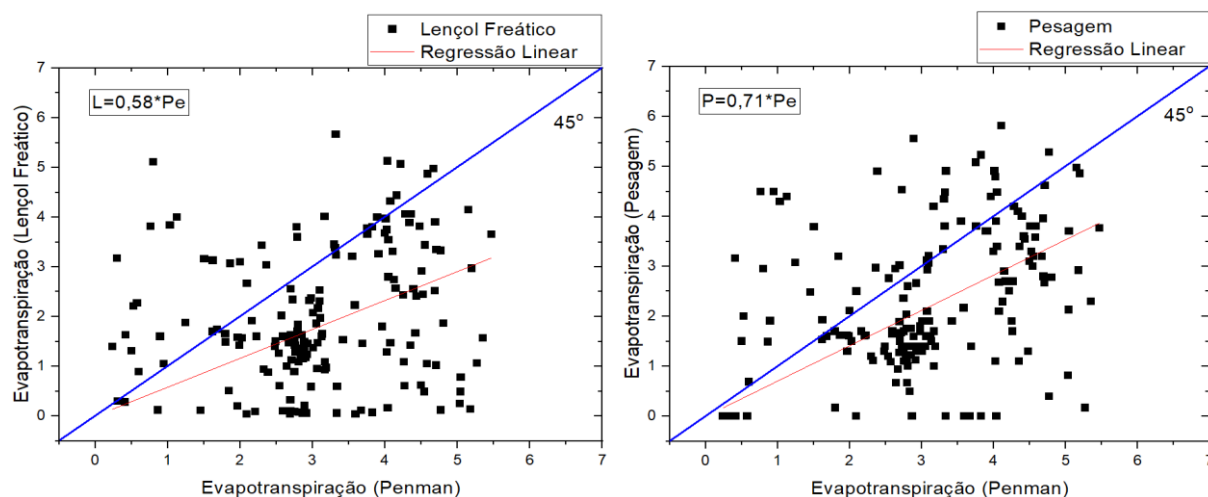
Figura 16 – Relação entre valores de ET_0 com métodos de estimativas, em escala diária



A Figura 17 mostra graficamente a relação entre os lisímetros de lençol freático (Figura 17a) e de pesagem (Figura 17b) com os valores estimados pela modelo de Penman-Monteith. Observou-se grande dispersão dos pontos em ambos os gráficos, evidenciando a dificuldade de se operar os lisímetros. Para o lisímetro de lençol freático obteve-se coeficiente angular de 0,58 e para o lisímetro de pesagem, 0,71.

Os valores encontrados por Penman-Monteith acabaram superestimando as medidas dos lisímetros também. Um fator que pode ter ocasionado esta diferença é a precipitação, já que neste ano considerado para o estudo, foi um ano muito chuvoso e, como dito anteriormente, é um fator climatológico de grande impacto nas medidas de evapotranspiração realizadas por lisímetros (PEREIRA et al., 1997).

Figura 17 – Relação entre valores de ET_0 estimadas pelo método de Penman-Monteith com medidas coletadas por lisímetros, em escala diária



Para verificar o desempenho, tanto dos lisímetros quanto os modelos de estimativa em relação ao modelo de Penman-Monteith, foram calculados os indicadores estatísticos MBE e RMSE. A Tabela 1 mostra os valores dos indicadores MBE e RMSE.

Tabela 1 – Resultado dos indicativos estatísticos dos modelos avaliados com a escala diária

Modelo	MBE	MBE (%)	RMSE	RMSE (%)
Hargreaves e Samani	0,69	22,2	1,49	48,2
Camargo	-0,27	-8,7	1,28	41,1
Thornthwaite	-0,33	-10,6	1,24	39,8
Lençol Freático	-1,12	-35,9	1,97	63,4
Pesagem	-0,75	-24,2	1,69	54,6

Legenda: Métodos de estima da evapotranspiração (Hargreaves e Samani, Camargo e Thornthwaite) e lisímetros que fornecem a evapotranspiração (Lençol Freático Constante e Pesagem)

Em todas as comparações foram observadas grandes dispersões dos dados, conforme elevado valor do indicador RMSE, variando de 39% a 63%. Já em relação

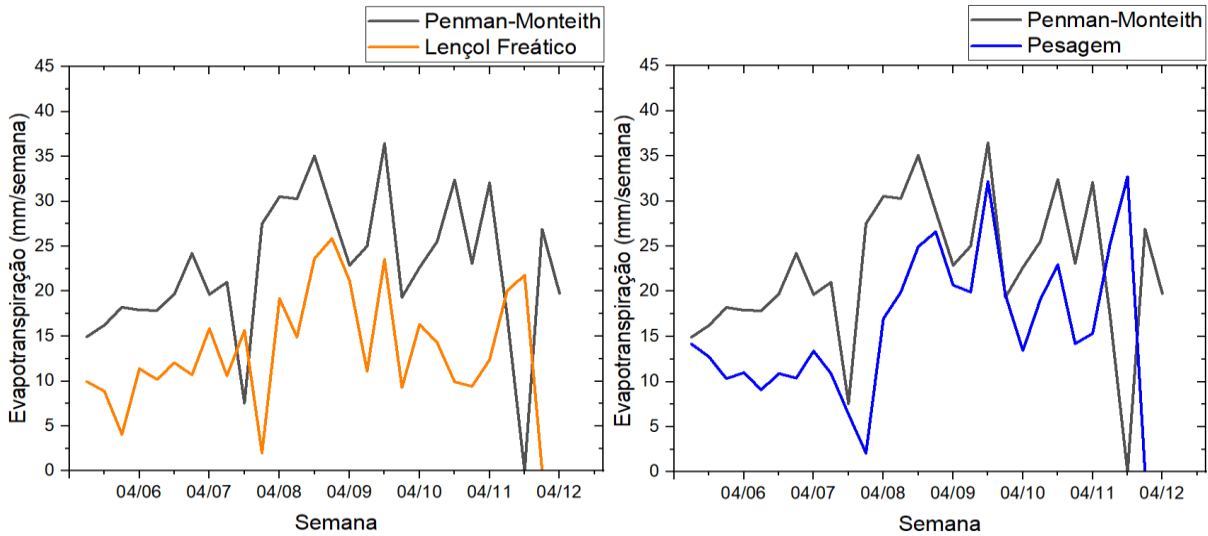
ao indicador MBE, apenas o modelo de Hargreaves-Samani apresentou valores positivos, ou seja, a estimativa do modelo de Hargreaves-Samani maior que a estimativa do modelo de Penman-Monteith. Já os demais modelos e os lisímetros produziram subestimativas em relação aos valores obtidos por Penman-Monteith.

As maiores subestimativas foram observadas para os lisímetros em relação ao modelo Penman-Monteith, com 36% e 24% de diferença para os lisímetros de lençol freático e de pesagem, respectivamente. Esses resultados podem ser atribuídos a 2 fatores: o primeiro está relacionado à dificuldade de operação com os lisímetros, o que pode causar grande flutuação dos dados; e o segundo está relacionado à equação de estimativa de onda longa utilizada pelo modelo de Penman-Monteith, a qual se baseia numa parametrização da atmosfera de localidades do EUA, com climas bem diferentes ao de Botucatu. Os modelos de Camargo e Thornthwaite apresentaram resultados satisfatórios, mesmo sendo projetados para partição de tempo média-mensal.

A figura 18 mostra a evolução temporal dos dados agrupados de 7 dias dos lisímetros com o modelo de Penman-Monteith, enquanto a Figura 19 mostra a evolução temporal dos agrupamentos de 7 dias para os modelos de estimativa em comparação com o modelo de Penman-Monteith.

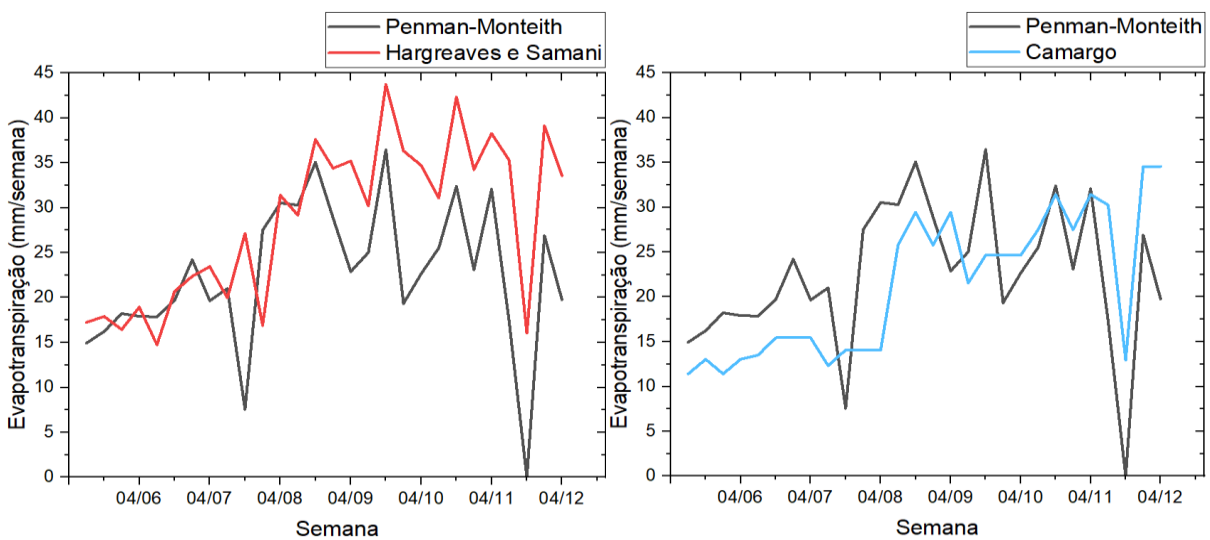
Em relação aos lisímetros, nota-se que as medidas dos lisímetros acompanham melhor as variações das estimativas do modelo de Penman-Monteith. Observa-se ainda superestimativas produzidas pelos valores do modelo de Penman-Monteith. De acordo com Gomes Jr. (2020), essas superestimativas estão relacionadas à metodologia de estimação da radiação de onda longa do modelo de Penman-Monteith.

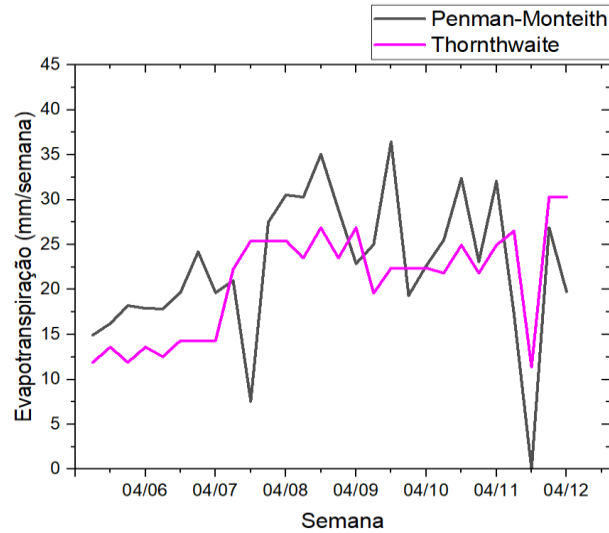
Figura 18 – Relação entre dados de evapotranspiração (ET₀) estimadas pelo método de Penman-Monteith com medidas coletadas por lisímetros, em escala semanal



Os modelos de Hargreaves-Samani, Camargo e Thornthwaite também apresentaram melhores ajustes quando comparados a escala diária. A Figura 19 mostra a evolução temporal dos modelos de Hargreaves-Samani, Camargo e Thornthwaite em relação ao modelo de Penman-Monteith.

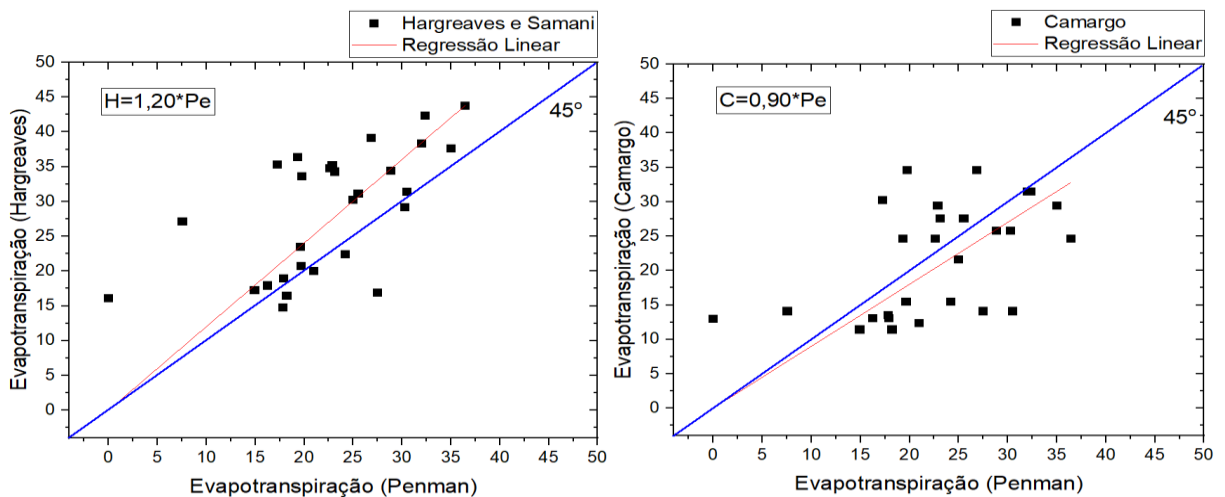
Figura 19 – Relação entre dados de evapotranspiração (ET₀) estimada com modelos estatísticos, em escala semanal

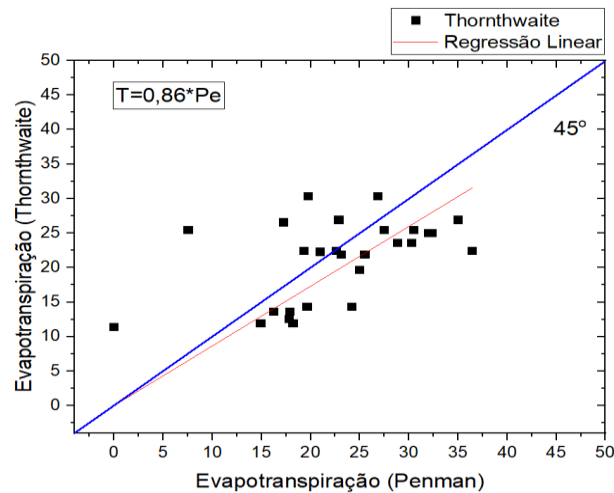




As análises de regressão linear mostradas na Figura 20 apresentam a relação entre os métodos de estimativas Hargreaves & Samani, Camargo e Thornthwaite com a estimativa de Penman-Monteith para o mesmo período. Pode ser observado que novamente o modelo apresentado pelo Hargreaves & Samani apresentou um valor superestimando Penman-Monteith, com um coeficiente angular de 1,20. Já os métodos de Camargo e Thornthwaite mantiveram um valor relativamente próximo e se adequaram melhor a escala aplicada, apresentando um coeficiente angular de 0,90 e 0,86 relativamente.

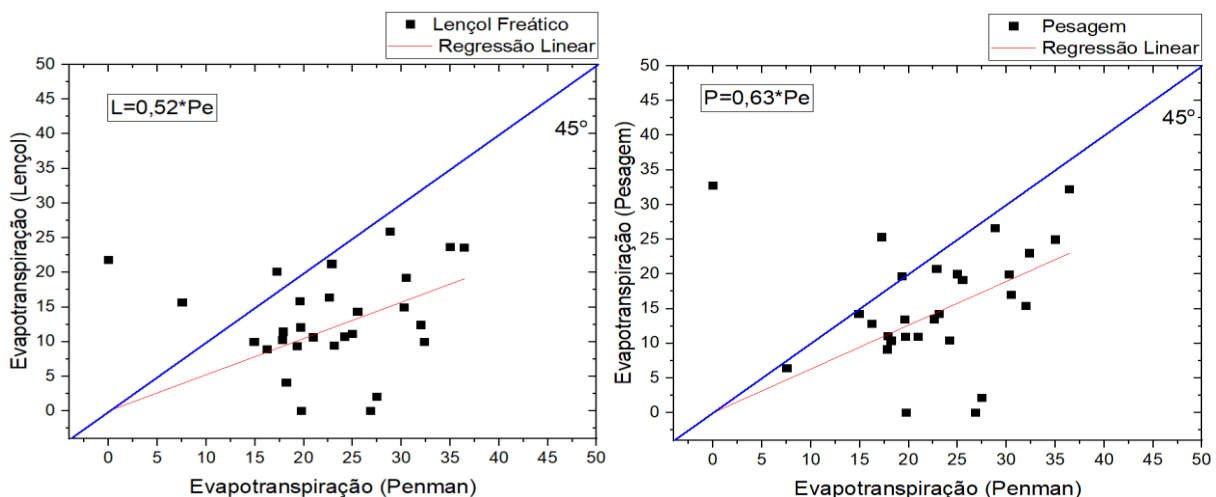
Figura 20 – Relação entre valores de ET_0 com métodos de estimativas, em escala semanal





Já em relação as medidas dos lisímetros, comparando com Penman-Monteith, apresentaram uma regressão semelhante, da mostrada anteriormente, com dados diários, onde o coeficiente angular, que resultou da relação de Penman-Monteith com o Lençol Freático, é 0,52 e, 0,63 para a relação do de Pesagem com Penman-Monteith. Estes dados analisados por meio dessa escala semanal, resultaram na mesma observação feita anteriormente, mantendo a ideia de existir um fator de correção para Penman-Monteith, já que ambos os dados resultantes dos lisímetros foram subestimados por Penman-Monteith. Ainda que a precipitação afeta a integridade da medida dos lisímetros, eles são de grande importância por fornecerem a evapotranspiração real, já que são equipamentos preparados para simular todo o processo.

Figura 21 – Relação entre valores de ET_0 com métodos de estimativas e medidas coletadas por lisímetros, em escala semanal



O resultado dos indicadores estatísticos mostrados na Tabela 2 são semelhantes ao apresentado na partição diária, já que os valores de MBE e RMSE são melhores nos modelos de Camargo e Thornthwaite, pois se aproximaram mais de zero. O modelo de Hargreaves & Samani apresentou um valor positivo de MBE, assim mostrando que este modelo apresentou valores superestimados em relação ao modelo de Penman-Monteith. Já em relação aos outros modelos, que apresentaram valores negativos, simbolizando que os valores encontrados aplicando o modelo de Penman-Monteith apresentaram superestimativas em relação aos demais modelos, onde o Lençol Freático e Pesagem apresentaram a maior diferença (-9,595 e -7,055, relativamente).

Tabela 2 – Resultado dos indicativos estatísticos dos modelos avaliados com a escala semanal

Modelo	MBE	MBE (%)	RMSE	RMSE (%)
Hargreaves e Samani	5,92	26,2	9,37	41,4
Camargo	-1,20	-5,3	7,84	34,7
Thornthwaite	-1,72	-7,6	7,22	32,0
Lençol Freático	-9,60	-42,5	13,72	60,7
Pesagem	-7,06	-31,2	12,71	56,2

Legenda: Métodos de estima da evapotranspiração (Hargreaves e Samani, Camargo e Thornthwaite) e lisímetros que fornecem a evapotranspiração (Lençol Freático Constante e Pesagem)

Para incrementar aos resultados encontrados, foi determinado o coeficiente de determinação (R^2) para todos os modelos de estimativa e os modelos dos lisímetros de pesagem em relação a Penman-Monteith. O resultado obtido consta na Tabela 3.

Por meio deste coeficiente é possível determinar qual modelo melhor se ajusta aos dados encontrados, quanto maior o seu valor melhor é o ajuste do modelo e, conseqüentemente, mais adequado.

Tabela 3 - Resultado dos coeficientes de determinação dos modelos avaliados

Modelo	Coeficiente de Determinação
Hargreaves e Samani	0,427
Camargo	0,385
Thornthwaite	0,327
Lençol Freático	0,195
Pesagem	0,335

Legenda: Métodos de estima da evapotranspiração (Hargreaves e Samani, Camargo e Thornthwaite) e lisímetros que fornecem a evapotranspiração (Lençol Freático Constante e Pesagem); Coeficiente de determinação (R^2)

Por meio dos coeficientes de determinação encontrados, pode-se afirmar que o modelo de estimativa Hargreaves-Samani indicou um melhor resultado (0,427), já que apresentou o maior valor entre os modelos. Logo após o modelo de Camargo apresentando um valor de 0,385 e, com valores bem próximos os modelos de Pesagem e Thornthwaite (0,335 e 0,327), respectivamente. Por último, apresentando o pior valor de coeficiente de determinação o modelo do lisímetro de Lençol Freático (0,195).

5 CONCLUSÕES

A partir do seguinte estudo, pode-se concluir que os dados apresentados pela medição do lisímetro de lençol freático constante e do lisímetro de pesagem estão discrepantes quando comparados ao método de estimativa de Penman, durante mesmo período e em ambas as partições de tempo (diárias e semanais), já que apresentaram valores que subestimam Penman-Monteith. Além disso, houve muita precipitação no ano apresentado, que acabou interferindo significativamente nos dados, por ser um fator climatológico de grande influência na medida de evapotranspiração. Já os dados estimados pelos modelos estatísticos, quando correlacionados ao método de estimativa de Penman-Monteith, estão mais semelhantes e possivelmente mais seguros, são eles os modelos de Camargo e Thornthwaite em ambas as partições.

O modelo de Hargreaves & Samani apresentou medidas que superestimaram Penman-Monteith, apresentando medidas mais satisfatórias em partição semanal e quando avaliados através do coeficiente de determinação, apresentando um R^2 maior em relação aos outros modelos. Os indicadores estatísticos apresentados comprovam que o modelo de Hargreaves & Samani teve um valor positivo, presente nas duas partições de tempo, os demais modelos e lisímetros, apresentaram valores negativos, assim superestimam Penman-Monteith.

Portanto, os resultados obtidos demonstram que medidas adquiridas pelos lisímetros, por mais que sejam considerados como melhores fornecedores das medidas da evapotranspiração por serem adquiridas através da medição, não são aconselháveis a usos futuros, do ano utilizado no trabalho. Estas medidas não se apresentaram confiáveis quando comparadas ao método de Penman-Monteith. Pela alta diferença na comparação, é recomendado, em estudos futuros, definir um fator de correção ou reformular a equação da radiação de onda longa, pois foi estipulada para a região dos EUA.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. J. G. Balanço de radiação em áreas de floresta e de pastagem em Rondônia. 2007. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 300p.

ÅNGSTRÖM, A. A study of the radiation of the atmosphere. Smithsonian Miscellaneous Collection, v. 65, p. 1-159. 1918.

BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. Q. J. R. Meteorol. Soc., v. 58, p. 389-418, 1932.

BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. Water Resour. Res., v. 11, n. 5, p. 742-744, Oct. 1975.

CARVALHO, M. W. L. et al. Comparação de dados meteorológicos e estimativa da radiação líquida e evapotranspiração de referência utilizando estações convencional e automática. Agrometeoros. v. 27, n. 2, p. 285-292, dez. 2019.

CAMPECHE, L. F. M. S. DE.; NETTO, A. O. A.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA DA, V. P. R. DE.; AZEVEDO, P. V. DE. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.5, p.519-525, 2011.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introdução a hidrologia. IPH UFRGS. 2008.

DAL PAI, A. et al. MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. Renewable Energy, v. 99, p. 754-763, 2016.

DOORENBOS, J. & KASSAN, A.H. Yield response to water. FAO. Irrig. and Drain. Paper 33, 1979, 193p.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. Crop water requirements. Rome: FAO, 1977. 204p. (Irrigation and Drainage Paper 24).

FLUMIGNAN, D. L. et al. Empirical methods for estimating reference surface net radiation from solar radiation. Engenharia Agrícola, v. 38, n. 1, p. 32-37. 2018.

FRANCO, J. R. Análise comparativa entre medidas meteorológicas da estação convencional e automática da fazenda Lageado no município de Botucatu – São Paulo - Brasil. São Paulo, p. 77, 2021.

IBGE. Brasil / São Paulo / Botucatu. Cidades: IBGE, 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 27 jul. 2022.

IDSO, S.B.; JACKSON R.D. Thermal Radiation from the Atmosphere. J. Geophys. Res., v. 74, n. 23, p. 5397-5403, Oct. 1969.

JENSEN, M.E., BURMAN, R.D; ALLEN, R.G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: ASCE, 1990.

LEE, T. M.; NAJIM, M. M. M.; AMINUL, M. H. Estimating evapotranspiration of irrigated rice at the West coast of the Peninsular of Malaysia. Journal of Applied Irrigation Science, v.39, n.1, p.103-117, 2004.

MENDONÇA, F. DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatologia noções básicas e clima do Brasil. São Paulo. Oficina de textos. 2007.

MONTEIRO, A. et al. Manutenção e calibração do termógrafo e higrógrafo. p. 18, [s.d.].

PELLISON, A. T. UNESP. Desenvolvimento de um sistema automático de aquisição de dados de evapotranspiração de referência por meio de microcontroladores de código aberto e de baixo custo. 11 maio 2018.

PEREIRA, A. B.; SENTELHA, P. C.; NOVA, N. A. V. Estimativa de balanço de energia radiante em função de elementos climáticos. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. v. 6, n. 2, p. 201- 206, 1998.

PRATA, A. J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, v. 122, p. 1127-1151, 1996.

PUPPO, L.; GARCÍA-PETILLO, M. Determinación del consumo de água del duraznero por lisimetria. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.1, p.25-31, 2010.

REIS, M. M; LOPES, E. M, G; OLIVEIRA, F. G. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estações meteorológicas convencional e automática. SE. In: XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. 2015.

ROSSI, T. J. et al. Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu/SP/Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 448- 459, 2018.

SATTERLUND, D.R. An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere. *Water Resour. Res.*, v. 15, p. 1649-1650, 1979.

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

SENTELHAS, P. C.; NASCIMENTO, A.L.C. Variação sazonal da relação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.18, n. 1, p. 71-77, 2003.

SOUZA, I. A; GALVANI, E; ASSUNÇÃO, H. F. Estudo comparativo entre elementos meteorológicos monitorados por estações convencional e automática na região de Maringá, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, v. 25, n. 2, p. 203-207, 2003.

STRASSBURGER, A. S. et al. Comparação da temperatura do ar obtida por estação meteorológica convencional e automática. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 2, p. 273–278, jun. 2011.

SWINBANK, W.C. Long-Wave Radiation from clear skies. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, v. 89, n. 381, p. 339-348, July. 1963.

TAGLIAFERRE, C. et al. Comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em eunápolis-BA. *Revista Caatinga, Mossoró*, v. 23, n. 1, p. 103-111, jan./mar. 2010.

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e Climatologia*. 2. ed., Recife: 2006.

YNOUE. et al. *Meteorologia: noções básicas*. São Paulo. Oficina de Texto, 2017.