

JOSÉ RAFAEL FRANCO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MEDIDAS METEOROLÓGICAS DA ESTAÇÃO
CONVENCIONAL E AUTOMÁTICA DA FAZENDA LAGEADO NO MUNICÍPIO DE
BOTUCATU - SÃO PAULO - BRASIL**

Botucatu

2021

JOSÉ RAFAEL FRANCO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MEDIDAS METEOROLÓGICAS DA ESTAÇÃO
CONVENCIONAL E AUTOMÁTICA DA FAZENDA LAGEADO NO MUNICÍPIO DE
BOTUCATU - SÃO PAULO - BRASIL**

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

Orientador: Prof. Dr. Enzo Dal Pai

Botucatu

2021

F825a	Franco, José Rafael Análise comparativa entre medidas meteorológicas da estação convencional e automática da fazenda Lageado no município de Botucatu - São Paulo - Brasil / José Rafael Franco. -- Botucatu, 2021 75 p. : il., tabs., fotos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Enzo Dal Pai 1. Meteorologia. 2. Climatologia. 3. Análise de regressão. 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: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MEDIDAS METEOROLÓGICAS DA
ESTAÇÃO CONVENCIONAL E AUTOMÁTICA DA FAZENDA LAGEADO NO
MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SÃO PAULO - BRASIL

AUTOR: JOSE RAFAEL FRANCO

ORIENTADOR: ENZO DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA
(IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ENZO DAL PAI (Participação Virtual)
Pós-Doutorando - Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. OSVALDO CESAR PINHEIRO DE ALMEIDA (Participação Virtual)
Análise e Desenvolvimento de Sistemas / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 29 de julho de 2021



*Dedico este estudo aos meus pais Osmar e Jurema por todo carinho e apoio
e a todos os meus colegas que estiveram presente nesta longa jornada.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as oportunidades da minha vida.

Aos meus queridos pais pelo apoio incondicional nesta jornada Osmar Franco e Jurema J. E. Franco.

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

A todos os demais professores envolvidos neste projeto, deixo meu muito obrigado pelos ensinamentos concedidos.

A todos os meus amigos que estiveram ao meu lado e sempre me deram apoio e motivação, deixo meu muito obrigado por toda ajuda e 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.

Ao CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

A todos os meus demais colegas de pesquisa expresso meus agradecimentos.

RESUMO

O processo de substituição de uma Estação Meteorológica Convencional (EMC) por uma Estação Meteorológica Automática (EMA) envolve questões de impacto, tais como transferir a confiança entre as diferentes tecnologias e existir duas séries históricas para cada elemento. O objetivo foi comparar os dados medidos pela EMC e EMA, verificando se é seguro desativar a EMC e se existe mudança significativa entre as estações. E quando possível fazer a reconstrução das séries históricas a partir da correlação nos dados convencionais. A literatura recomenda que o processo de atualização de tecnologia dos instrumentos deve ser realizado após análise comparativa das medições feitas pelas duas estações (validação). Para comparação e análise dos dados meteorológicos, por meio de regressão linear simples, foi considerado o período de 01/01/2015 a 31/12/2016, da EMC e EMA localizadas no Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia (22°54'S, 48°27'O e 786m) da Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP) de Botucatu - São Paulo - Brasil. As medidas analisadas foram: temperatura máxima (Tmax), mínima (Tmin) e média (Tmed) do ar; umidade relativa média do ar (UR); velocidade média do vento (U_2) e precipitação (Prec). Para comparação foram utilizados os indicadores estatísticos d; MBE; rMBE; RMSE; rRMSE; R e R^2 . Para reconstrução das séries históricas foi criado um modelo de regressão linear para estimar os dados da EMA com base nas medidas da EMC utilizando o método bootstrap e validação cruzada K-Fold. Os dados foram divididos aleatoriamente em 70% para criação do modelo de estimativa e 30% para validação em um laço de 1000 repetições, os mesmos indicadores da comparação foram usados para avaliar a capacidade do modelo fazer previsão. A comparação entre a EMC e EMA apresentaram os seguintes resultados, do melhor para o pior, a Prec teve um R^2 de 0,984, a Tmax teve um R^2 de 0,961, Tmed teve um R^2 de 0,917, a Tmin teve um R^2 de 0,844, a UR teve um R^2 de 0,811 e, por fim, a U_2 teve um R^2 de 0,746. Apesar das diferenças no período de amostragem, e da resolução dos instrumentos, a comparação apresentou bons resultados. Os resultados apresentam que é seguro desativar a EMC, os modelos de estimativa permitiram reconstruir as séries históricas.

Palavras-chave: meteorologia; climatologia; análise de regressão.

ABSTRACT

The process of replacing a Conventional Weather Station (EMC) by an Automatic Weather Station (EMA) involves issues of impact, such as transferring trust between different technologies and having two historical series for each element. The objective was to compare the data measured by EMC and EMA, verifying whether it is safe to disable EMC and whether there is significant change between stations. And when possible, reconstruct the historical series from the correlation with conventional data. The literature recommends that the instrument technology update process should be carried out after a comparative analysis of the measurements made by the two stations (validation). For comparison and analysis of meteorological data, through simple linear regression, the period from 01/01/2015 to 12/31/2016 was considered, by EMC and EMA located in the Department of Rural Engineering and Socioeconomics (22°54'S, 48°27'W and 786m) from the Faculty of Agronomic Sciences (UNESP) of Botucatu - São Paulo - Brazil. The measures analyzed were: maximum (Tmax), minimum (Tmin) and average (Tmed) air temperature; mean relative humidity (RH); average wind speed (U2) and precipitation (Prec). For comparison, the statistical indicators d; MBE; rMBE; RMSE; rRMSE; R and R². To reconstruct the historical series, a linear regression model was created to estimate EMA data based on EMC measurements using the bootstrap method and K-Fold cross validation. Data were randomly divided into 70% for estimation model creation and 30% for validation in a 1000-repeat loop, the same comparison indicators were used to assess the model's ability to make predictions. The comparison between EMC and EMA showed the following results, from best to worst, Prec had an R² of 0.984, Tmax had an R² of 0.961, Tmed had an R² of 0.917, Tmin had an R² of 0.844, the UR had an R² of 0.811 and, finally, U₂ had an R² of 0.746. Despite the differences in the sampling period and the resolution of the instruments, the comparison showed good results. The results show that it is safe to disable EMC, the estimation models allowed reconstructing the historical series.

Keywords: meteorology; climatology; regression analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Termômetro de Temperatura Máxima e Mínima do Ar e Sensor Automático para Medir a Temperatura do Ar	29
Figura 2 – Higrógrafo Convencional e Sensor Automático para Medir a Umidade Relativa do Ar.....	30
Figura 3 – Pluviômetro Convencional e Automático das Estações Meteorológicas da Fazenda Lageado Botucatu – São Paulo – Brasil	32
Figura 4 – Anemômetro Convencional e Automático das Estações Meteorológicas da Fazenda Lageado Botucatu – São Paulo – Brasil	33
Figura 5 – Abrigo Meteorológico Convencional e Automáticos das Estações Meteorológicas da Fazenda Lageado Botucatu – São Paulo – Brasil.....	34
Figura 6 – Série histórica (1971-2016) da Estação Meteorológica Convencional da Fazenda Lageado do Município de Botucatu – São Paulo – Brasil.....	37
Figura 7 – Comparação da Precipitação Acumulada Diário (a), Erro absoluto (b) e Correlação Entre a EMC e EMA (c) para o Município de Botucatu –	46
Figura 8 – Comparação da Temperatura Máxima do Ar Diário (a), Erro Absoluto (b) e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de Botucatu – São Paulo – Brasil	49
Figura 9 – Comparação da Temperatura Mínima do Ar Diário (a), Erro absoluto (b) e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de Botucatu –	52
Figura 10 – Comparação da Temperatura Média do Ar Diário (a), Erro Absoluto (b) e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de Botucatu –	55
Figura 11 – Comparação da Umidade Relativa Média do Ar Diário (a), Erro Absoluto (b) e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de	58
Figura 12 – Comparação da Velocidade Média do Vento Diário (a), Erro Absoluto e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Instrumentos utilizados para mensurar os elementos do clima na EMC e EMA: fabricante, sensibilidade/resolução e unidade de medida.....	38
Tabela 2 – Período Amostral e Cálculo para Obtenção dos Elementos do Clima pela EMC e EMA	39
Tabela 3 – Aplicação do Filtro Desvio Relativo Percentual (DR) nos Elementos Analisados no período de 01/01/2015 a 31/12/2016 Registrados pela EMC e EMA.....	44
Tabela 4 – Indicativos Estatísticos Para Comparação da Precipitação Obtida Pela EMC e EMA.....	47
Tabela 5 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Estimativa da Precipitação pela EMC.....	47
Tabela 6 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Precipitação Registrada pela EMA e Estimada pela EMC	48
Tabela 7 - Indicativos Estatísticos Para Comparação da Temperatura Máxima do ar Obtida Pela EMC e EMA	50
Tabela 8 - Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Estimativa da Temperatura Máxima do ar pela EMC	50
Tabela 9 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Temperatura Máxima do ar Registrada pela EMA e pela EMC	51
Tabela 10 – Indicativos Estatísticos Para Comparação da Temperatura Mínima do ar Obtida Pela EMC e EMA	53
Tabela 11 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Criação do Modelo de Estimativa da Temperatura Mínima do ar pela EMC.....	53
Tabela 12 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Temperatura Mínima do ar Registrada pela EMA e Estimada pela EMC	54
Tabela 13 – Indicativos Estatísticos Para Comparação da Temperatura Média do ar Obtida Pela EMC e EMA	56
Tabela 14 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Criação do Modelo de Estimativa da Temperatura Média do ar pela EMC.....	56

Tabela 15 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Temperatura Mínima do ar registrada pela EMA e Estimada pela EMC	57
Tabela 16 – Indicativos Estatísticos Para Comparação da Umidade Relativa Obtida Pela EMC e EMA	59
Tabela 17 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Estimativa da Umidade Relativa pela EMC	59
Tabela 18 – Indicativos Estatístico para Comparação da umidade Relativa registrada pela EMA e Estimada pela EMC	60
Tabela 19 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Velocidade do Vento Obtida pela EMC e EMA.....	62
Tabela 20 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Estimativa da Velocidade do vento pela EMC	62
Tabela 21 – Indicativos Estatístico para Comparação da Velocidade do Vento registrada pela EMA e Estimada pela EMC	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMA	estação meteorológica automática
EMAs	estações meteorológicas automáticas
EMC	estação meteorológica convencional
EMCs	estações meteorológicas convencionais
DR	desvio relativo percentual
INMET	instituto nacional de meteorologia
Prec	precipitação
Prec _{EMA}	precipitação da estação meteorológica automática
Prec _{EMC}	precipitação da estação meteorológica convencional
Tmax	temperatura máxima do ar
Tmax _{EMA}	temperatura máxima do ar da estação meteorológica automática
Tmax _{EMC}	temperatura máxima do ar da estação meteorológica convencional
Tmed	temperatura média do ar
Tmed _{EMA}	temperatura média do ar da estação meteorológica automática
Tmed _{EMC}	temperatura média do ar da estação meteorológica convencional
Tmin	temperatura mínima do ar
Tmin _{EMA}	temperatura mínima do ar da estação meteorológica automática
Tmin _{EMC}	temperatura mínima do ar da estação meteorológica convencional
U ₂	velocidade do vento a 2 metros de altura
U _{2EMA}	velocidade do vento da estação meteorológica automática
U _{2EMC}	velocidade do vento da estação meteorológica convencional
WMO	world meteorological organization

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
°C	graus celsius
°F	graus fahrenheit
mm	milímetro
m s-1	metros por Segundos
km h-1	quilômetros por Hora
R ²	coeficiente de Determinação
r	coeficiente de Correlação
MBE	mean bias error
rMBE	relative mean bias error
d	índice de concordância
RMSE	root mean square error
rRMSE	relative root mean square error

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1	Estação Meteorológica	25
2.2	Diferenças entre uma EMC e EMA	26
2.2.1	Diferenças na Composição dos Sensores	26
2.2.2	Diferenças na Aquisição de Dados.....	26
2.3	Elementos do Clima e Instrumentos de Medida	27
2.3.1	Temperatura do Ar	27
2.3.2	Umidade Relativa do Ar	29
2.3.3	Precipitação	30
2.3.4	Velocidade do Vento	32
2.3.5	Abrigo Meteorológico	33
2.4	Comparação EMC e EMA.....	34
3	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1	Localização e Clima	36
3.2	Instrumentos Meteorológicos	37
3.3	Dados Analisados	40
3.4	Indicativos Estatísticos.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Precipitação	45
4.2	Temperatura Máxima do Ar	48
4.3	Temperatura Mínima do Ar	51
4.4	Temperatura Média do Ar	54
4.5	Umidade Relativa.....	57
4.6	Velocidade do Vento	60
5	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos sobre o clima foram realizados por volta de 350 a.c. pelo filósofo grego Aristóteles, relatando os entendimentos sobre o clima da época em sua obra *meteorológica*. Os primeiros instrumentos meteorológicos aparecem no século XV, neste período a meteorologia adquiriu caráter de ciência natural. Com o passar do tempo ocorreu avanço no desenvolvimento dos instrumentos utilizados para monitorar o clima, possibilitando a transmissão de dados, análise e previsão de eventos climáticos. Os estudos e conhecimentos sobre os elementos meteorológicos são de extrema importância, pois as condições atmosféricas interferem nas atividades humanas. Como por exemplo a escolha de locais para moradia e cultivo, recursos hídricos e a agropecuária entre muitos outros (YNOUE et al., 2017).

A agropecuária é uma das áreas da economia que se encontra em grande crescimento tecnológico, de forma que novas tecnologias permitem cada vez mais qualidade e produtividade agrícola. Um exemplo de avanço tecnológico é a transmissão de dados meteorológicos, que auxilia no monitoramento do clima e das atividades agropecuárias em tempo real (CARVALHO, 2019). A disponibilização de informações atualizadas, possibilita a tomada de medidas preventivas referente ao controle de irrigação, aplicação de defensivos agrícolas, identificação de risco de incêndio, suspeitas de geada, monitoramento da presença de pragas e doenças na lavoura, classificação do clima local, identificação das melhores épocas para plantio e colheita entre várias outras aplicações (REIS; LOPES; OLIVEIRA; 2015; SOUZA; GALVANI; ASSUNÇÃO, 2003; TAGLIAFERRE et al., 2010). Outra aplicação utilizando dados meteorológicos em tempo real que vem se destacando é a estimativa da evapotranspiração de referência (TAGLIAFERRE et al., 2010).

Para que essas aplicações ocorram é necessário a substituição dos instrumentos meteorológicos convencionais por instrumentos automáticos. Muitos motivos levam a essas substituições, como: operação em locais remotos de difícil acesso, maior tempo amostral, necessidade de transmissão das informações de forma automática, calibração dos instrumentos, confiabilidade das medidas e falta de aparelhos e funcionários capacitados para manter uma EMC em funcionamento (STRASSBURGER et al., 2011). O processo de substituição de uma EMC com uma grande série de dados medidos, para uma EMA com uma nova série, gera um

problema referente a homogeneização das duas séries de dados históricos (REIS; LOPES; OLIVEIRA, 2015).

Segundo Sentelhas et al. (1997) surge uma questão importante ao substituir uma EMC por uma EMA, referente à homogeneização da série histórica, devido a mudança dos equipamentos duas séries de dados são formadas, uma com medidas convencionais e outra com medidas automáticas, possuindo diferença amostral (período e frequência que as medidas são registradas). Além da diferença na resolução dos instrumentos, por essa questão o estudo de comparação entre as estações permite transferir a confiança dos instrumentos mecânicos e manuais para os sensores eletrônicos, de modo que as duas séries possam ser unidas.

O processo de alteração dos instrumentos convencionais para os sensores e equipamentos automáticos não é uma mudança simples (ALMEIDA; SOUZA; MORAIS, 2007). É recomendado que o processo de alteração de uma estação meteorológica por outra deve ser realizado somente após a análise comparativa entre ambas as estações meteorológicas, efetuando uma coleta de dados simultâneos entre as duas tecnologias. Essa etapa deve ser reproduzida para cada localidade onde será realizada a alteração (SENTELHAS et al., 1997; STRASSBURGER et al 2010).

O objetivo deste estudo foi realizar uma análise comparativa entre as medidas diárias de precipitação (Prec), temperatura máxima do ar (Tmax), temperatura média do ar (Tmed), temperatura mínima do ar (Tmin), umidade relativa média do ar (UR) e velocidade média do vento a 2 metros de altura (U_2) registradas na EMC e EMA, simultaneamente no período de 01/01/2015 a 31/12/2016, na fazenda Lageado da Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) de Botucatu - SP - Brasil. Objetivou-se também a estimação das series históricas da EMA a partir de medições realizadas pela EMC no período de 1971 a 2015, permitindo desta forma a criação de uma série de dados única para a EMA com início em 1971 até os dias atuais para cada elemento do clima.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estação Meteorológica

O estudo sobre o clima é de extrema importância para a sociedade. No entanto, para que isto ocorra, torna-se necessário medidas meteorológicas procedentes de fontes confiáveis, como por exemplo estações meteorológicas. Uma estação meteorológica é composta por instrumentos que registram medidas dos elementos do clima: radiação solar, temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, precipitação e pressão atmosférica. Alguns instrumentos devem ficar instalados ao ar livre como o pluviômetro e anemômetro, enquanto outros devem ser alocados dentro de abrigos meteorológicos, como é o caso dos termômetros e psicômetros, ao realizar suas devidas medições. As Medições devem ser realizadas seguindo os padrões definidos pela WMO (Organização Mundial de Meteorologia), para que os dados possam ser utilizados em comparações entre diferentes regiões.

Os registros das medidas coletadas ao longo do tempo permitem a realização de estudos para a identificação das características do clima de determinada região e localidade, além de possibilitar a análise de eventos climáticos ocorridos. Esse tipo de informação pode ser utilizado na agricultura, possibilitando precisão no planejamento agrícola com base nos acontecimentos históricos do clima (VAREJÃO-SILVA, 2006; YNOUE et al., 2017). Para este caso existem as estações agrometeorológicas, que é uma subcategoria voltada para atividades agrícolas, capazes de realizar as observações climáticas tradicionais em união com medidas de evaporação e evapotranspiração (GALINA; VERONA, 2004). O monitoramento dos elementos do clima tem ajudado não apenas o aumento na produtividade agrícola, como também o aumento na qualidade de seus produtos (SENTELHAS et al., 1997).

De forma genérica uma estação meteorológica pode ser classificada em convencional (EMC) e em automática/digital (EMA). Uma EMC é uma atividade que necessita do acompanhamento diário de um observador meteorológico para realizar a anotação das medidas mensuradas pelos instrumentos. Já uma EMA é um modelo que opera com sensores eletrônicos, permitindo o registro dos dados coletados por meio de um sistema automatizado de coleta (datalogger). Esse sistema é composto por dispositivos eletrônicos que realizam a coleta das medições oriundas dos sensores, possibilitando, inclusive sua programação, o armazenamento,

processamento e a transmissão das informações em tempo real (GALINA; VERONA, 2004).

2.2 Diferenças entre uma EMC e EMA

2.2.1 Diferenças na Composição dos Sensores

A composição entre os instrumentos convencionais e automáticos são diferentes, uma vez que neste primeiro caso o princípio de funcionamento é mecânico e no segundo é digital. Porém, uma das maiores diferenças está na forma em que a medida coletada é registrada e depois transmitida, ou seja, na aquisição do dado. Os instrumentos automáticos são compostos por sensores eletrônicos que reagem aos elementos do clima, permitindo mensurá-los com uma grande resolução (YNOUE et al., 2017). Os instrumentos convencionais possuem o princípio de funcionamento com base na composição do elemento sensível, de forma que cada instrumento possui suas particularidades e acompanhamento do observador meteorológico.

Os termômetros possuem como elemento sensível o álcool ou mercúrio, tal que o movimento deste material informa a temperatura do ar. A umidade pode ser medida de várias formas, utilizando termômetros de mercúrio (psicrômetro), cabelo humano ou crina de cavalo (higrógrafo) como elemento sensível, neste último caso o material se contrai ou expande com a variação da umidade presente no ar, resultando na medida. A precipitação e velocidade do vento são medidas por instrumentos que possuem o mesmo princípio de funcionamento na EMC e EMA, apresentando apenas uma diferença na sensibilidade e forma de registrar os valores captados (VAREJÃO-SILVA, 2006.). Em alguns casos os instrumentos mecânicos convencionais possuem a capacidade de registrar as medidas em papel durante um período de 24 horas.

2.2.2 Diferenças na Aquisição de Dados

As medidas registradas pela EMC são coletadas de forma manual por um observador meteorológico. Esse processo ocorre, geralmente, uma vez ao dia, devido a razões econômicas, de forma que se define o mesmo horário para realizar a leitura (SILVA; CHAVES; LIMA, 2009). No entanto algumas instituições que requerem maior cobertura temporal realizam mais de uma vez. No Brasil, por padrão as observações

são realizadas às 00:00, 12:00 e 18:00 UTC ou as 00:00 UTC e 12:00 UTC, definidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os observadores desconhecem datas comemorativas, pois em sua ausência as medidas meteorológicas não são coletadas. O conjunto de medidas registradas é chamado de série histórica, compreendendo diversos anos de medições (VIANELLO, 2011).

As medidas coletadas pela EMA são realizadas por um sistema de aquisição de medidas (datalogger), que permite a aplicação de programas desenvolvidos para efetuar procedimentos, processamento, cálculos complexos, armazenamento e a transmissão das informações remotamente. As medidas podem ser coletadas em diferentes períodos (diário, horário e sub-horário), com maior resolução e disponibilidade, diferente da EMC que necessita da locomoção do observador até os instrumentos para verificar as medidas. A junção de várias EMAs permite a criação de grandes redes meteorológicas para a coleta de informações climáticas, no Brasil a maior delas pertence ao INMET, que é composta por uma variedade de EMAs e algumas EMCs espalhadas pelo país (GALINA; VERONA, 2004).

2.3 Elementos do Clima e Instrumentos de Medida

2.3.1 Temperatura do Ar

A temperatura é um índice que expressa a quantidade de calor sensível em um corpo, no caso da temperatura do ar este valor é a porção de calor contido no ar. O termo temperatura do ar à superfície é usado para informar a temperatura predominante em um ponto da atmosfera sobre a superfície terrestre. Por padrão definido pela WMO, as observações de temperatura do ar devem ser realizadas entre 1,5 e 2,0 metros de altura acima do nível do solo, de forma que o instrumento deve ser armazenado dentro de abrigos meteorológicos (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; VAREJÃO-SILVA, 2006).

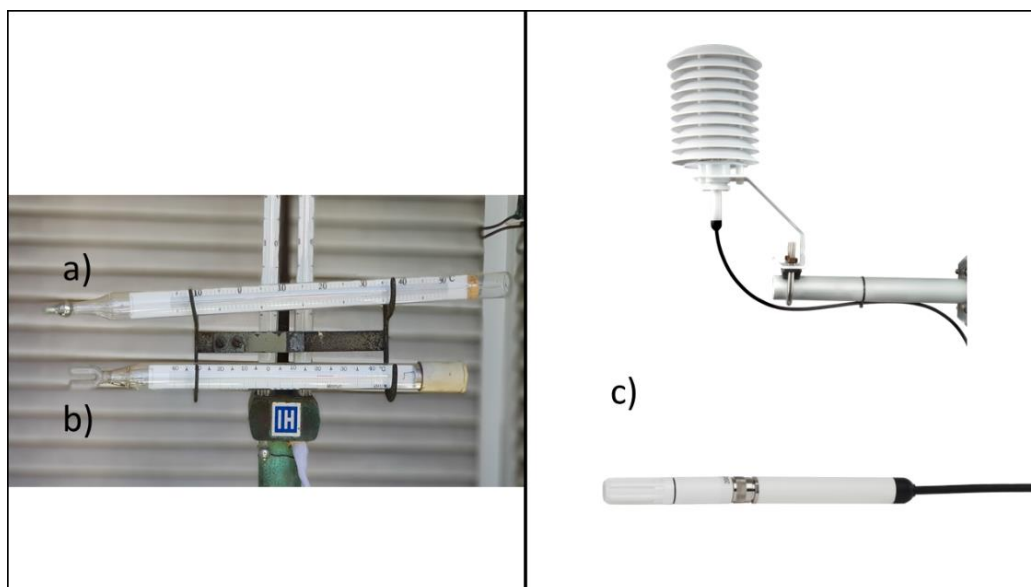
A temperatura do ar possui um ciclo em condições normais, atingindo um valor máximo diário (maior temperatura registrada) e mínimo (menor temperatura registrada). O valor máximo ocorre no período da tarde, aproximadamente duas horas após a culminação do sol (momento de maior radiação solar recebida pela terra). O

valor mínimo ocorre antes do sol nascer, quando a presença de algum fenômeno não altera este ciclo (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Para registrar a variação da temperatura durante o dia na EMC é utilizado o termômetro de máxima e mínima. O termômetro de máxima (Figura 1a) é composto de mercúrio que possui um estrangulamento próximo ao bulbo, permitindo a passagem do mercúrio quando a temperatura se eleva e impede seu retorno quando a temperatura diminui, registrando a maior temperatura. O termômetro de mínima (Figura 1b) é composto de álcool que funciona de forma oposta ao termômetro de máxima, este instrumento possui uma peça chamada de índice que se move quando a temperatura diminui, registrando a menor temperatura. Os termômetros devem ser preparados para novas leituras diariamente por um observador meteorológico. A temperatura média do ar, corresponde à média entre a temperatura máxima e mínima (YNOUE, 2017). Além dos termômetros existem os instrumentos mecânicos e eletrônicos que registram a temperatura de forma automática, fornecendo um maior número de registros durante um período. A temperatura do ar pode ser medida em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; VAREJÃO-SILVA, 2006; YNOUE, 2017).

Na EMA um único sensor (Figura 1c), realiza as medidas das temperaturas máxima, mínima e média do ar. Possuindo uma faixa de medição entre -50°C a $+100^{\circ}\text{C}$. Para realizar as medições o instrumento é fixado no abrigo meteorológico, que possui o mesmo princípio do funcionamento do abrigo convencional, de impedir que o instrumento seja exposto a radiação solar e permitir a circulação do ar (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2021).

Figura 1 – Termômetro de Temperatura Máxima e Mínima do Ar e Sensor Automático para Medir a Temperatura do Ar



Fonte: a) Incaper (2018), b) Campbell Scientific (2021).

2.3.2 Umidade Relativa do Ar

A água é o único elemento que pode estar presente no ar em seus três estados físicos: sólido (formação de gelo), líquido (chuva) e gasoso (vapor d'água). Sua concentração no ar se refere a uma das fases do ciclo hidrológico, que necessita da superfície contida (rios, lagos, mares, oceanos, solo e vegetação), bem como dos aspectos da atmosfera. A entrada de água da superfície para a atmosfera ocorre pelos processos de transpiração (liberação de vapor d'água pelas plantas) e evaporação (mudança do estado líquido para o gasoso), onde as moléculas de água consomem energia, denominado de calor latente de evaporação. Essa energia é retida pela água, mantendo as moléculas em excitação molecular e a água como vapor. Desta forma, a evaporação transforma o calor sensível absorvido em calor latente, resfriando o ar, pois a energia consumida não será usada para aquecê-lo (YNOUE, 2017).

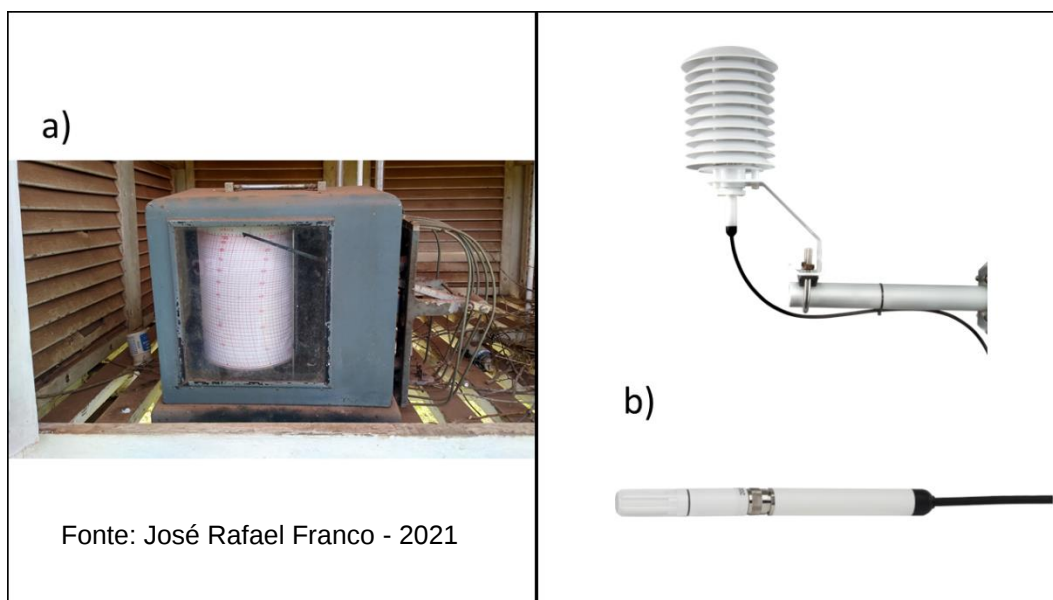
O termo mais conhecido para se identificar a quantidade de água presente no ar é umidade relativa do ar. Esta medida expressa uma relação de proporção relativa entre o vapor d'água presente no ar e seu ponto de saturação, mostrando em porcentagem o volume de vapor d'água que está contido no ar em relação ao valor máximo possível sobre a temperatura que se encontra. As medidas são realizadas

por instrumentos denominados higrômetro, termohigrometro, psicrômetro e outros tipos de sensores eletrônicos (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

O instrumento convencional, presente na EMCs, utilizado para medir a umidade relativa é o higrógrafo (Figura 2a) que utiliza o cabelo humano ou crina de cavalo como elemento sensível. Com a variação da umidade do ar, o cabelo humano se estica com o aumento e se contrai com seu decréscimo. Esse material é diretamente ligado a um sistema de engrenagens que realiza uma demarcação em papel, registrando a variação da umidade do ar durante um determinado período (VAREJÃO-SILVA, 2006; YNOUE, 2017).

A Figura 2b apresenta o sensor utilizado nas EMAs, possui um funcionamento capacitivo avançado que permite medir a umidade relativa do ar com precisão. O sensor presente nesses instrumentos possui uma faixa de medição para umidade relativa do ar de 0 a 100%. Em geral, esse sensor é contido no mesmo instrumento que realizada as medidas de temperatura nas EMAs (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2021).

Figura 2 – Higrógrafo Convencional e Sensor Automático para Medir a Umidade Relativa do Ar



Fonte: b) Campbell Scientific (2021).

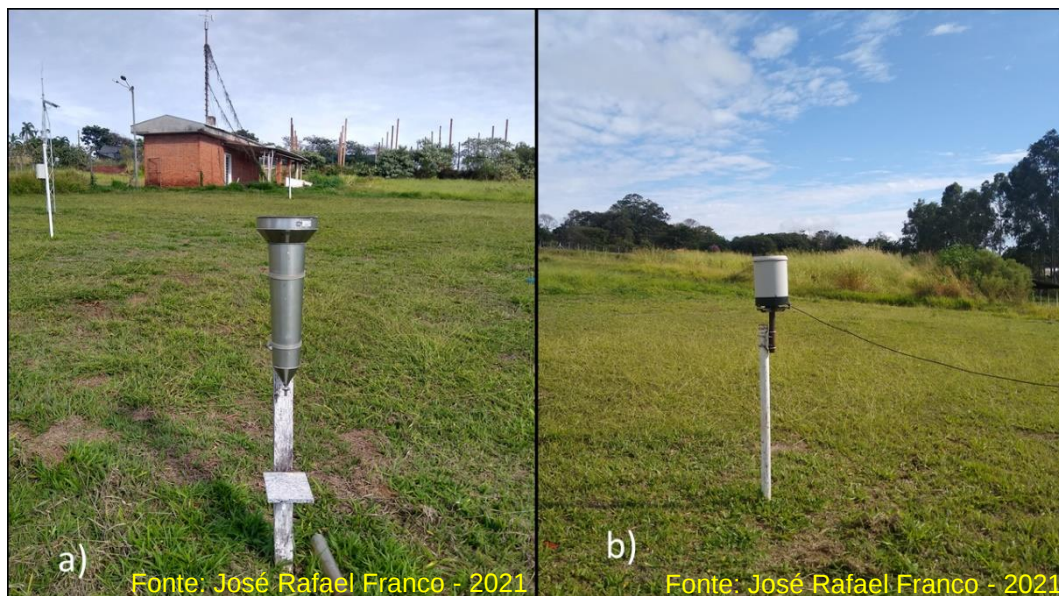
2.3.3 Precipitação

Toda água da atmosfera que chega à superfície (chuva, granizo, neve, orvalho, neblina ou geada) é chamada de precipitação. A água presente na atmosfera se

encontra no estado de vapor em sua maior parte. A concentração de saturação é o volume máximo de vapor d'água contido no ar sem condensar, que pode ocorrer variação devido a temperatura do ar, de forma que é armazenado maior volume de vapor d'água em temperaturas mais elevadas. O processo de formação da chuva está relacionado ao movimento de uma massa de ar úmida. Com a queda da temperatura, o volume de vapor d'água armazenado no ar é menor, ocorrendo a condensação. Quando esse processo acontece, pequenas gotículas começam a se formar, permanecendo suspensas no ar. Nas condições apropriadas essas gotículas crescem até atingir tamanho e peso para vencer as correntes de ar que as sustentam, nesta etapa a água que estava nas nuvens cai sobre a superfície na forma de chuva. (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

A medida de precipitação é realizada nas EMAs e EMCs por meio dos pluviômetros, que registram o volume precipitado em milímetros (mm) (YNOUE, 2017). A pluviometria é o estudo da quantificação das precipitações. A precipitação representa a quantidade de água em litro por metro quadrado, caracterizada pela sua duração entre o tempo de início, término e por sua intensidade (volume precipitado). O pluviômetro padrão utilizado no Brasil (Figura 3a), é o modelo *Ville de Paris* possuindo reservatório com capacidade de armazenar a precipitação das últimas 24h. O pluviômetro automático (Figura 3b), também conhecido como pluviômetro basculante, registra o volume de água captada no recipiente de balança ligado a sensores eletrônicos que registram a precipitação, permitindo o registro de medidas sub-horárias (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Figura 3 – Pluviômetro Convencional e Automático das Estações Meteorológicas da Fazenda Lageado Botucatu – São Paulo – Brasil

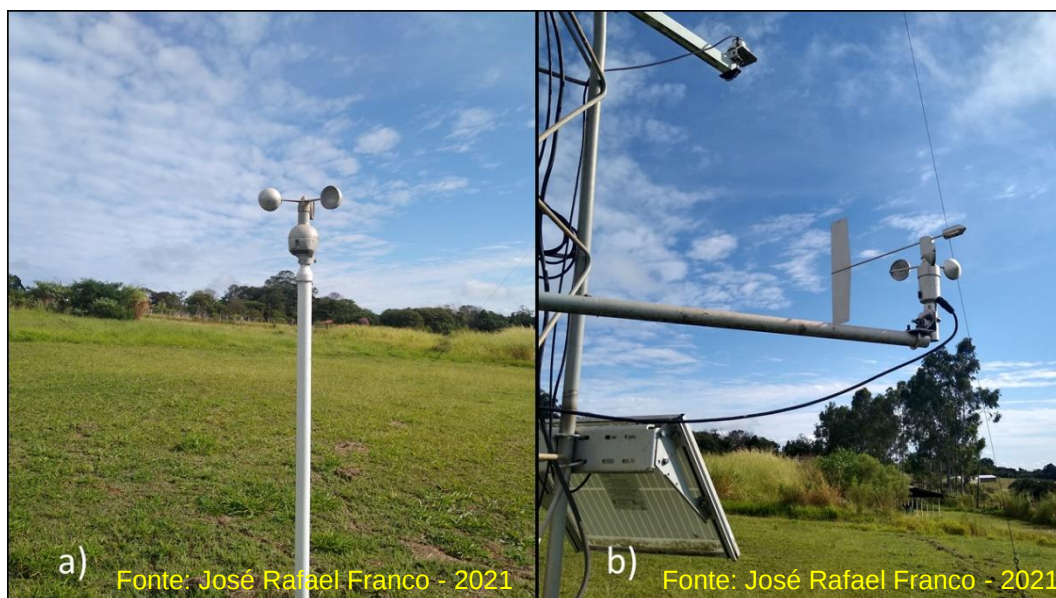


2.3.4 Velocidade do Vento

Os ventos são deslocamentos de ar no sentido horizontal, de áreas com maior pressão para áreas de menor pressão atmosférica, que transportam as características térmicas e higrométricas do local de origem. A direção e velocidade do vento são determinadas pela variação espacial e temporal da pressão atmosférica. Quanto maior a diferença de pressão atmosférica entre duas áreas, maior será a velocidade do vento. Esta variação é afetada pela rugosidade da superfície presente nos continentes (vegetação, cidades, montanhas e relevos). Desta forma os ventos apresentam maiores velocidades em áreas livres de obstáculos como nos oceanos (VAREJÃO-SILVA, 2006; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA 2007; YNOUE, 2017).

A anemometria é o estudo da quantidade de vento (velocidade e direção). A velocidade do vento, é medida em metros por segundos (m s^{-1}), quilômetros por hora (km h^{-1}) ou nós medidas por um anemômetro (YNOUE, 2017). O instrumento utilizado para mensurar a velocidade do vento é o anemômetro de concha, composto por 3 conchas que registram a velocidade do vento com saída analógica (Figura 4a) ou digital (Figura 4b). O número de giros das conchas determina a velocidade do vento (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Figura 4 – Anemômetro Convencional e Automático das Estações Meteorológicas da Fazenda Lageado Botucatu – São Paulo – Brasil



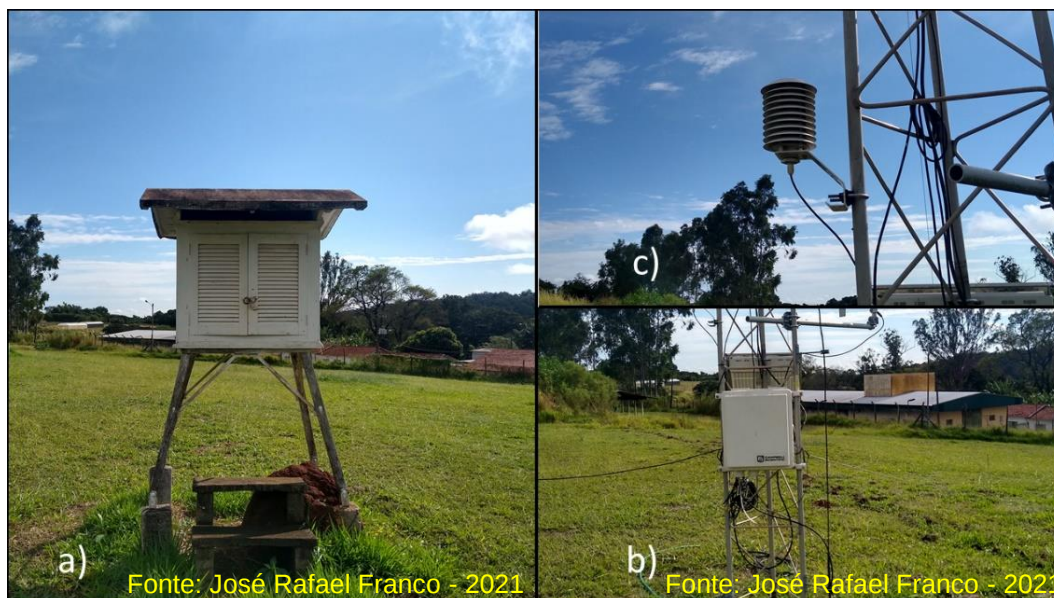
2.3.5 Abrigo Meteorológico

Os abrigos meteorológicos são construídos sobre padrões definidos pela WMO para armazenar os instrumentos meteorológicos convencionais (Figura 5a) responsáveis por medir a temperatura máxima mínima e média do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica. O abrigo de uma EMC é projetado para impedir que a radiação solar incida diretamente nos instrumentos, no caso do Brasil a porta de abertura é direcionada para o hemisfério sul, posicionado a uma altura padrão entre 1,5 e 2,0 metros de altura do solo sobre área aberta e gramada, longe de obstáculos. O abrigo é composto por paredes com venezianas que permitem a passagem do ar, bem como é pintado na cor branca para refletir a radiação solar (VAREJÃO-SILVA, 2006; YNOUE, 2017).

Uma EMA possui dois tipos de abrigos meteorológicos, o abrigo da Figura 5b, semelhante a um quadro de comando elétrico, que possui a finalidade de proteger os dispositivos eletrônicos que possibilitam o funcionamento da estação automática como datalogger, módulo de alimentação, bateria e módulo de transmissão de dados. Protegendo os componentes eletrônicos da entrada de chuva, umidade e proteção contra a entrada de insetos e animais. O segundo tipo é o abrigo apresentado na Figura 5c, que é responsável por armazenar o sensor de temperatura e umidade

relativa do ar, sua composição é semelhante ao abrigo tradicional da EMC (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2021).

Figura 5 – Abrigo Meteorológico Convencional e Automáticos das Estações Meteorológicas da Fazenda Lageado Botucatu – São Paulo – Brasil



2.4 Comparação EMC e EMA

Os primeiros estudos de comparação entre EMA e EMC foram realizados por Sentelhas et al. (1997) no município de Piracicaba – SP. Os elementos meteorológicos analisados foram: temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa média do ar, irradiância solar global e precipitação. A comparação foi realizada por meio de visualização gráfica, análise de regressão pelo coeficiente de determinação (R^2) e seguindo os indicativos estatísticos: índice de concordância (d); erro máximo (ME); erro absoluto médio (EAM); coeficiente de determinação (CD); eficiência (EF) e coeficiente de massa crítica (CRM). Identificando boa concordância entre as medidas registradas pela EMC e EMA. Oliveira et al. (2010) analisaram os mesmos elementos, além de velocidade do vento e pressão atmosférica. As medidas diárias foram comparadas e analisadas estatisticamente, por meio da análise da regressão. Apresentando bons resultados de comparação para precipitação e temperatura máxima, mínima e média do ar.

Comparações mais atuais foram realizadas Carvalho et al. (2019) analisando medidas diárias de temperatura máxima, mínima e média do ar, velocidade do vento,

umidade relativa média do ar, precipitação, pressão atmosférica, radiação líquida e estimativa da evapotranspiração (Penman-Monteith) no município de Teresina – PI. Encontrando boa correlação para os dados de temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa média do ar, pressão atmosférica, precipitação e radiação líquida.

Outros estudos foram identificados na literatura, utilizando os mesmos métodos de comparação e análise da regressão, realizados em diferentes localidades Brasileiras, como por exemplo: SOUZA, GALVANI & ASSUNÇÃO (2003) Maringá - PA; CUNHA, MARTINS (2004) Botucatu – SP; ALMEIDA, SOUZA, MORAIS (2007) São João do Cariri – PB; PEREIRA et al. (2008) Londrina – PR; FUNARI & PEREIRA FILHO (2009) São Paulo – SP; ABREU & BECKER (2011) Brasília – DF; ALMEIDA & HERMENEGIDIO (2013) Areia – PB; REIS, LOPES & OLIVEIRA (2015) Monte Claro – MG; RIBEIRO et al. (2017) – 6 cidades – PI; e LIMA (2020) Imperatriz – MA.

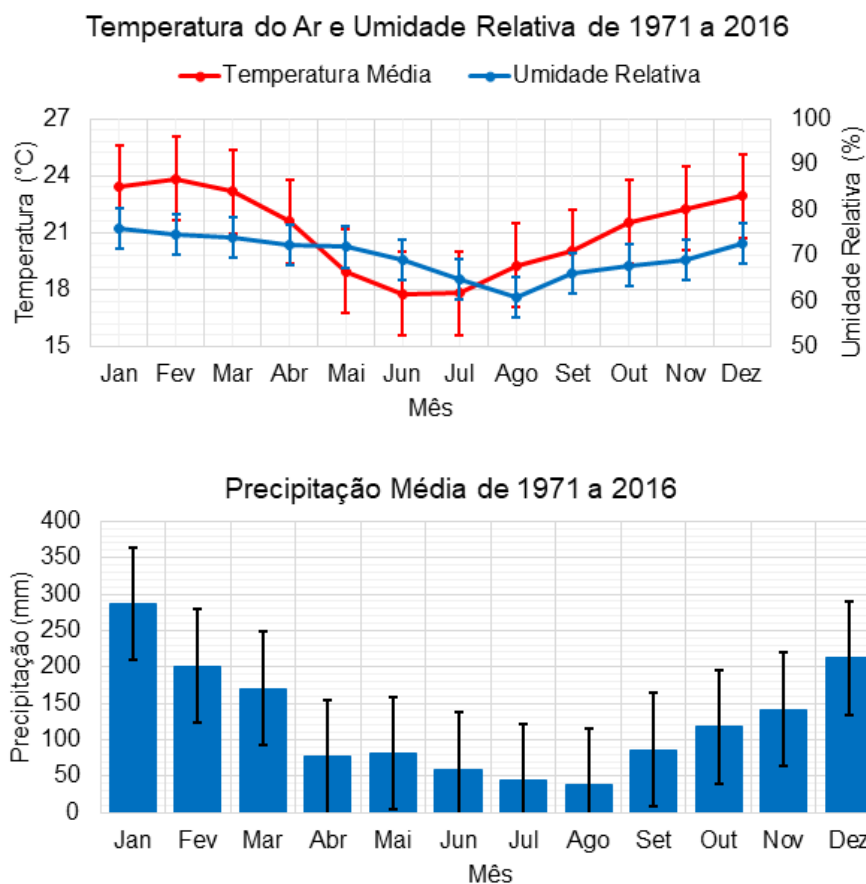
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Clima

O estudo foi realizado na EMC e EMA (22°54'S, 48°27'O e 786m) do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP) de Botucatu - São Paulo - Brasil. Botucatu é uma cidade semi-rural localizada na região centro-sul do estado de São Paulo e a aproximadamente 221 km do oceano Atlântico. Com bioma Cerrado e Mata Atlântica, o município possui área territorial de 1.482,682 km² e população de 148 mil habitantes, bem como é localizado entre duas extensas bacias (Barra Bonita e Jurumirim), com sua principal atividade sendo a agropecuária, o cultivo cana-de-açúcar e eucalipto (IBGE, 2021; DAL PAI et al., 2016; ROSSI, et al., 2018).

Seguindo os critérios de Köppen, o clima de Botucatu apresenta classificação Cwa, mesotérmico (subtropical e temperado) com verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos (ROSSI et al., 2018; SMAABC, 2002). A série de dados de 1971 a 2016 (Figura 6) apresenta temperatura média do ar de 21,04 °C, umidade relativa média de 69,8% e precipitação acumulada anual média de 1521,76 mm. O mês mais quente ocorre em fevereiro, com temperatura máxima média de 28,59 °C, o mês mais chuvoso ocorre em janeiro, com precipitação acumulada média de 286,60 mm e umidade relativa média de 75,79 %. O período mais frio ocorre entre junho e julho, com temperatura média de 17,79 °C. O mês mais seco ocorre em agosto, com precipitação acumulada média de 38,02 mm e umidade relativa do ar média de 60,79.

Figura 6 – Série histórica (1971-2016) da Estação Meteorológica Convencional da Fazenda Lageado do Município de Botucatu – São Paulo – Brasil



3.2 Instrumentos Meteorológicos

Na Tabela 1 são apresentados os instrumentos utilizados pela EMC e EMA, seus elementos sensíveis, fabricante, resolução e unidade de medida para mensurar os elementos do clima.

Tabela 1 – Instrumentos utilizados para mensurar os elementos do clima na EMC e EMA: fabricante, sensibilidade/resolução e unidade de medida

Estação	Variável	Elemento Sensor	Fabricante	Sensibilidade/Resolução	Unidade De Medida
EMC	Tmax	Mercúrio	R.FUESS	0,2 °C	°C
	Tmin	Álcool	R.FUESS	0,2 °C	°C
	Tmed	--	--	--	°C
	UR	Harpa de Cabelo	Salmoiraghi	5 %	%
	Prec	Pluviômetro Ville De Paris	IR	0,1mm	mm
	U ₂	Conjunto de 3 Canecas	Lambrecht	0,5 m s ⁻¹	km h ⁻¹
EMA	Tmax	Termistor	Campbell Scientific	0,1°C	°C
	Tmin	Termistor	Campbell Scientific	0,1°C	°C
	Tmed	Termistor	Campbell Scientific	0,1°C	°C
	UR	Capacitor	Campbell Scientific	0,8%	%
	Prec	Báscula	Campbell Scientific	2% no intervalo de operação	mm
	U ₂	Conjunto de 3 Canecas	Campbell Scientific	0,12 m s ⁻¹	m s ⁻¹

As medidas registradas na EMC foram realizadas por meio de um observador meteorológico diariamente as 9:00h. Os dados da EMA foram coletados de forma automática, utilizando um datalogger CR1000 da Campbell Scientific, com período de coleta de dados a cada 5 minutos. Para realizar a comparação das medidas de

precipitação e velocidade do vento foram utilizadas as medidas diárias da EMC e medidas horárias da EMA das 9:00h até as 9:00h como é realizado na EMC. Para as medidas de precipitação foi utilizado a soma dos valores horários da EMA, para a velocidade no vento foi utilizado a média dos valores horários da EMA. A

Tabela 2 apresenta o período da aquisição de dados de cada instrumento e composição da medida.

As medidas de velocidade do vento foram registras em km h^{-1} pela EMC, para comparação foi necessário a conversão das medidas Equação (3), onde U_{EMC} é a velocidade média do vento diária em km h^{-1} e U_2 a velocidade do vento em m s^{-1} .

$$U_2 = \frac{U_{\text{EMC}}}{86,4} \quad (3)$$

A temperatura média do ar – T_{med} (Equação 4) na EMC é calculada utilizando a temperatura máxima e mínima do ar. Onde T_{max} é a temperatura máxima do ar e T_{min} a temperatura mínima do ar registrada no mesmo período.

$$T_{\text{med}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \quad (4)$$

Tabela 2 – Período Amostral e Cálculo para Obtenção dos Elementos do Clima pela EMC e EMA

Elemento	EMC	EMA
T_{max}	Leitura às 9:00h	Maior Valor em 24 horas
T_{min}	Leitura às 9:00h	Menor Valor em 24 horas
T_{med}	$T_{\text{med}} = (T_{\text{max}} + T_{\text{min}})/2$	$\sum T_{\text{Med}_j} / 288^{**}$
UR	$\sum UR_i / 24^{*}$	$\sum UR_j / 288^{**}$
Prec	Leitura às 9:00h	Somatória das medidas coletadas das 9:00h do dia n às 9:00h do dia n+1
U_2	Leitura às 9:00h	Média das medidas coletadas das 9:00h do dia n às 9:00h do dia n+1

Legenda: * Medida obtida a cada 1 hora ($i = 01:00, 02:00, \dots, 24:00$), ** Medida obtida a cada 5 minutos ($j = 0:00, 00:05, \dots, 23:55$).

3.3 Dados Analisados

O período de dados analisado foi de 01/01/2015 a 31/12/2016 na resolução temporal diária, registrado de forma simultânea na EMC e EMA. Os elementos meteorológicos analisados foram: temperatura máxima do ar (°C); temperatura mínima do ar (°C); temperatura média do ar (°C); umidade relativa média do ar (%); precipitação (mm) e velocidade média do vento a 2 metros de altura (m s⁻¹).

Para a realização do estudo, as medidas foram filtradas, a fim de identificar possíveis erros de mensuração, utilizando o desvio relativo percentual - DR, Equação (5) permitindo identificar a grandeza da diferença entre os dados da amostra primária (medidas convencionais) com relação aos dados da amostra secundária (medidas automáticas) (ARENALES; DAREZZO, 2008).

Foram definidos critério de cortes para eliminação, utilizando o valor DR. Para cada elemento foi definido um valor em porcentagem indicando o intervalo de medidas válidas. Para identificação dos valores de corte foi criado um gráfico de dispersão das medidas diárias, os valores foram ajustados com base na dispersão e dos pontos utilizando análise gráfica exploratória pelo microsoft excel 365. A fim de eliminar a menor quantidade de medidas possível, mantendo a qualidade da série. As medidas eliminadas pelo filtro não foram utilizadas neste estudo.

$$DR_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_i - Y_i|}{|Y_i|} \right) 100 \quad (5)$$

Onde X representa as medidas da EMA, Y as medidas da EMC e i representa o dia que a medida foi registrada.

Foram usados dados da EMC e EMA para estimar um modelo de regressão linear simples onde y são as medidas da EMA e x as medidas da EMC. Isso foi feito para todos os elementos meteorológicos, sendo possível comparar as medidas da EMC e EMA pela na Equação 6 e estimar as medidas da EMA utilizando medidas da EMC.

$$y = bx + a \quad (6)$$

A técnica de reamostragem Bootstrap consiste na reutilização de um mesmo conjunto de dados por várias vezes sorteados de forma aleatória. A reamostragem permite criar diferentes alternativas para teste, obtendo o desvio padrão e o intervalo de confiança em percentil dos dados analisados. Neste método é recomendado a reamostragem utilização de 1000 repetições (RIZZO; CYMROT, 2006).

A validação cruzada foi o método utilizado para avaliar o desempenho do modelo em diferentes situações amostral, dividindo os dados em dois grupos, uma parte para criação do modelo e outra parte para validação. Na validação cruzada K-Fold os dados são separados em blocos e em cada bloco são divididos aleatoriamente entre a criação do modelo e os dados de treinamento (ROHANI; TAKI; ABDOLLAHPOUR, 2018).

Para criação e validação do modelo de regressão linear simples. Os dados foram sorteados e separados aleatoriamente, onde 70% foram usados para criação do modelo de estimativa e 30% para avaliar a capacidade do modelo fazer previsão. A criação do modelo de regressão linear simples e sua validação foram realizadas utilizando um laço de repetições de 1000 vezes, para cada passagem do laço as medidas foram separadas aleatoriamente entre a criação do modelo e validação por meio dos indicadores estatísticos.

3.4 Indicativos Estatísticos

Os indicadores estatísticos foram utilizados para avaliar duas situações. A primeira situação foi para comparar os dados obtidos de forma convencional (EMC) e automática (EMA), onde os dados foram analisados uma única vez pelos indicadores utilizando todas as medidas coletadas. A segunda situação foi analisar as medidas registradas pela EMA com as medidas estimadas pela equação utilizando medidas da EMC, avaliando o desempenho do modelo para fazer previsão, separando o período de dados entre criação do modelo e validação, em um laço de repetição de 1000 vezes.

Para a comparar os dados foi realizado a análise da regressão e visualizações gráficas, foram utilizados os coeficientes de determinação (R^2) e correlação (r) e os seguintes indicadores estatísticos: índice de concordância de Wilmott 1985 (d); Mean Bias Error (MBE) e relativo ($rMBE$); Root Mean Square Error (RMSE) e relativo ($rRMSE$). O índice de concordância d (Equação 7), descrito por Wilmott et al. (1985),

tem seus valores que variam entre 0 (nenhuma concordância) e 1 (concordância perfeita). O MBE (Equação 8) quantifica a diferença entre os pares de dados, comparando-os a fim de identificar uma tendência significativa em superestimar ou subestimar sistematicamente os valores. O RMSE (Equação 10) estima o erro absoluto indicado pelas diferenças entre os pares de dados avaliados, dando um maior peso para grandes erros. Para os indicativos MBE e RMSE valores próximos de zero são desejáveis. Os valores relativos rMBE (Equação 9) e rRMSE (Equação 11) fornecem o grau de correspondência percentual proporcional à média da observação. O r (Equação 12) e R^2 (Equação 13) fornece o grau de correlação entre os pares de dados comparados (RANIERO, 2020; RINCÓN et al., 2018).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y' - Y| + |Y_i - Y|)^2} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)}{n} \quad (8)$$

$$rMBE (\%) = \frac{MBE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (9)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$rRMSE (\%) = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (11)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}') (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}')^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}') (Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}')^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (13)$$

Para comparação das medidas entre a EMC e EMA, Y' representa as medidas de comparação (EMC), Y as medidas de referência (EMA), e n o número de observações, $\bar{Y}'$ é a média das medidas da EMC e $\bar{Y}$ a média das medidas de referência (EMA).

Na avaliação de desempenho dos modelos de estimativa, Y' representa as medidas estimadas pela equação utilizando as medidas da EMC, Y os dados de referência (EMA), e n o número de observações, $\bar{Y}'$ é a média das medidas dos valores estimados pela equação e $\bar{Y}$ a média das medidas de referência (EMA).

Todo o processamento de dados foi realizado utilizando a linguagem de programação R no ambiente de desenvolvimento RStudio. Os valores de saída do laço de 1000 vezes foram a média e desvio padrão dos indicadores e o intervalo de confiança em percentil dos coeficientes da equação. Analisando desta forma a previsão do modelo e sua variação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do filtro DR permitiu eliminar as medidas incorretas registradas, não sendo utilizadas na comparação. A Tabela 3 apresenta o valor total de medidas de cada elemento e a quantidade de medidas eliminadas pelo filtro. O elemento com maior número de registros eliminados foi a Tmin com 28,01%, os erros ocorreram devido à perda de sensibilidade do termômetro de mínima, que utiliza álcool como elemento sensível diferente do termômetro da Tmax, que teve a menor quantidade de dados filtrados, com 5,15% das medidas eliminadas que utiliza o mercúrio como elemento sensível. Os erros registrados na Tmin interferiram no cálculo da Tmed, que foi a segunda variável que teve mais dados eliminados no filtro.

Tabela 3 – Aplicação do Filtro Desvio Relativo Percentual (DR) nos Elementos Analisados no período de 01/01/2015 a 31/12/2016 Registrados pela EMC e EMA

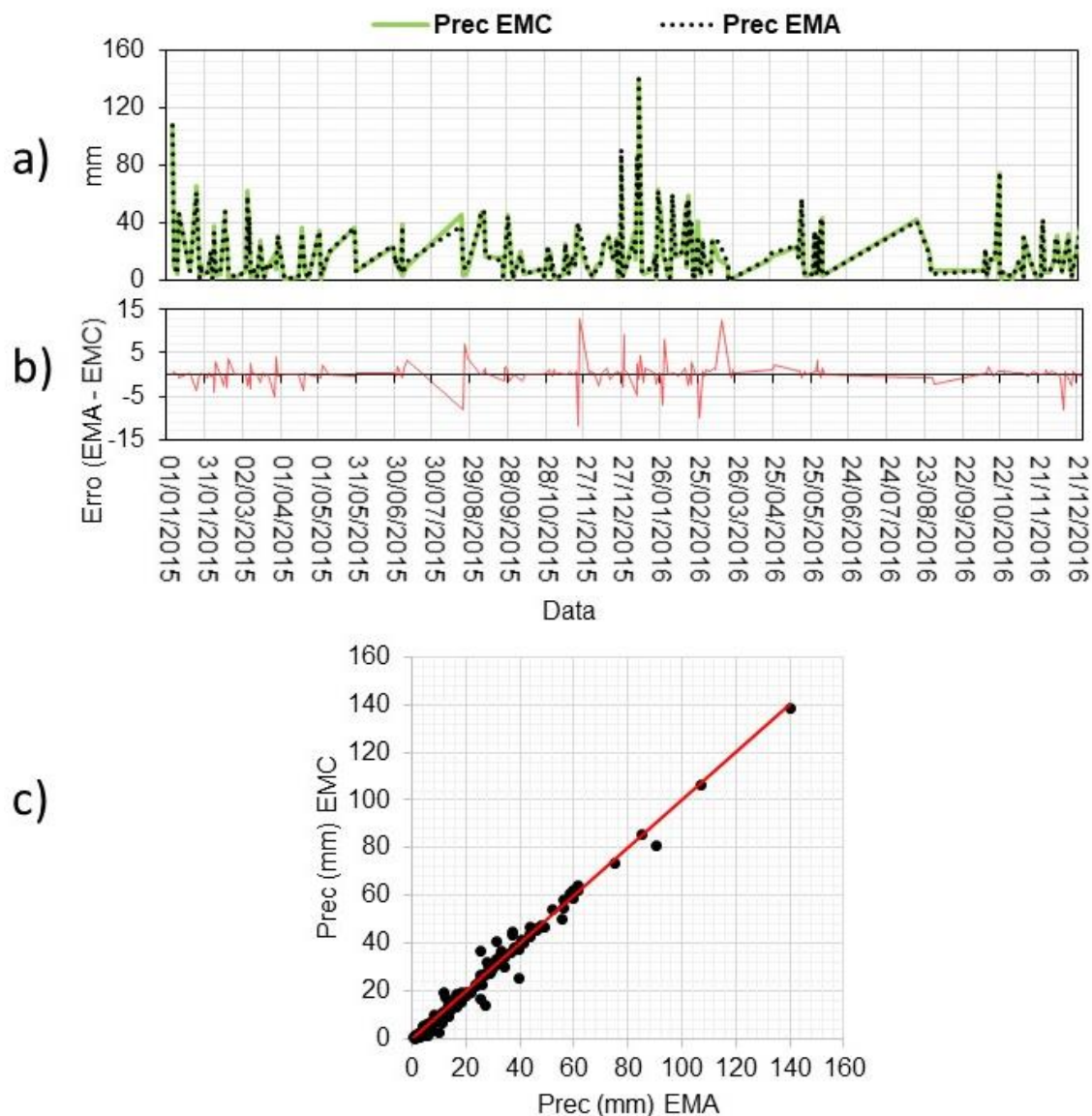
VARIÁVEL	TOTAL	PONTO DE CORTE	DADOS ELIMINADOS	RESTANTE
Tmin	707	18%	28,01%	509
Tmed	703	13%	20,20%	561
U ₂	706	66%	17,14%	585
UR	587	18%	8,52%	537
Prec	208	74%	5,29%	197
Tmax	718	14%	5,15 %	681

Para comparação das variáveis obtidas pela EMC e EMA foram feitos três gráficos para análise visual das medidas. O primeiro gráfico em linha comparando os dados diários registrados, o segundo gráfico identifica a diferença entre as medidas (erro) realizadas pelas estações meteorológicas e o terceiro gráfico analisando a correlação entre as medidas.

4.1 Precipitação

Para efetuar a comparação os dias que não ocorreram precipitação foram desconsiderados. A Figura 7a apresenta as medidas de precipitação (Prec) acumulada diária, registradas pela EMC e EMA. As medidas coletadas por ambas as estações apresentaram valores próximos em dias chuvosos com ocorrência menor que 40 mm. Os valores também foram similares para dias que ocorreu precipitação intensa, próxima a 140 mm. O valor acumulado na série foi de 3593,15 mm registrados na EMC e 3618,79 mm na EMA. A Figura 7b apresente o erro absoluto entre as estações meteorológicas. A Figura 7c indica a associação entre as medidas diárias acumuladas de precipitação (Prec) obtidas pela EMC e EMA. O resultado apresentou forte correlação positiva, com pouca dispersão dos pontos. A forte correlação também pode estar associada a menor quantidade de medidas, inferiores as demais variáveis analisadas.

Figura 7 – Comparação da Precipitação Acumulada Diário (a), Erro absoluto (b) e Correlação Entre a EMC e EMA (c) para o Município de Botucatu – São Paulo – Brasil



A Tabela 4 apresenta os indicadores estatísticos para comparação entre as estações meteorológicas. As medidas de precipitação registradas pela EMA foram 0,708% menores que as medidas obtidas pela EMC, com diferença de 0,130 mm. A comparação apresentou 2,602 mm de erro absoluto (rRMSE 14,166%) entre a EMC e EMA. Ribeiro et al. (2017), indicam subestimativa nas medidas registradas pela EMC em relação a EMA em alguns municípios no estado do PI. Resultados com maiores valores obtidos pela EMC em comparação a EMA foram encontrados por Sentelhas et al. (1997) e Oliveira et al. (2010).

Tabela 4 – Indicativos Estatísticos Para Comparação da Precipitação Obtida Pela EMC e EMA

MBE (mm)	rMBE (%)	RMSE (mm)	rRMSE (%)	r	d
-0,130	-0,708	2,602	14,166	0,992	0,995

A precipitação foi o elemento que obteve o melhor desempenho de comparação (R^2 0,984) e alto índice de concordância (0,995). Resultados semelhantes foram identificados por Sentelhas et al. (1997) no município de Piracicaba - SP, apresentando correlação de 0,988 (R^2) e concordância de 0,993 (d). Oliveira et al. (2010) também obtiveram resultados similares (R^2 0,995 e d 0,99) no município de Jaboticabal - SP. Carvalho et al. (2019) encontraram uma correlação próxima (R^2 0,988) e índice de concordância superior (d 0,999) na cidade de Teresinha - PI.

Em seguida, foi ajustado um modelo para estimar os valores da EMA em função das medidas da EMC, juntamente com os indicadores da validação do modelo ajustado. A

Tabela 5 apresenta a média e o desvio padrão dos coeficientes resultantes da criação do modelo, bem como a média e o desvio padrão do desempenho obtido na validação. Para a criação do modelo foi possível perceber que se obteve um baixo desvio padrão se comparado a média, o que indica que durante as 1000 repetições utilizando o bootstrap e a validação cruzada (K-Fold) o modelo gerou resultados satisfatórios, com pouca variação. Os coeficientes gerados pelo modelo de regressão linear foram avaliados pelo intervalo de confiança percentil. A Equação 14 apresenta o modelo criado para estimar os dados de precipitação.

Tabela 5 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Estimativa da Precipitação pela EMC

Coeficiente	Estimativa Bootstrap Média (desvio padrão)	IC (95%) percentil	R^2
Intercepto (a)	0,539 (0,132)	[0,2998;0,8184]	0,984
Inclinação (b)	0,977 (0,008)	[0,9577;0,9904]	

$$\text{Prec}_{\text{EMA}} = (0,977 \text{ Prec}_{\text{EMC}} + 0,539) \quad (14)$$

A Tabela 6 apresenta os indicativos estatísticos para validação do modelo comparando as medidas de precipitação registradas na EMA com as medidas estimadas com dados da EMC. As medidas da EMA foram 0,020% menores que as medidas estimadas, com diferença de 0,012 mm. O modelo obtido apresentou 2,529 mm de erro absoluto (rRMSE 13,909%). O modelo criado apresentou menor MBE e rMBE, os demais indicativos tiveram resultados próximos aos valores encontrados na comparação entre a EMC e EMA.

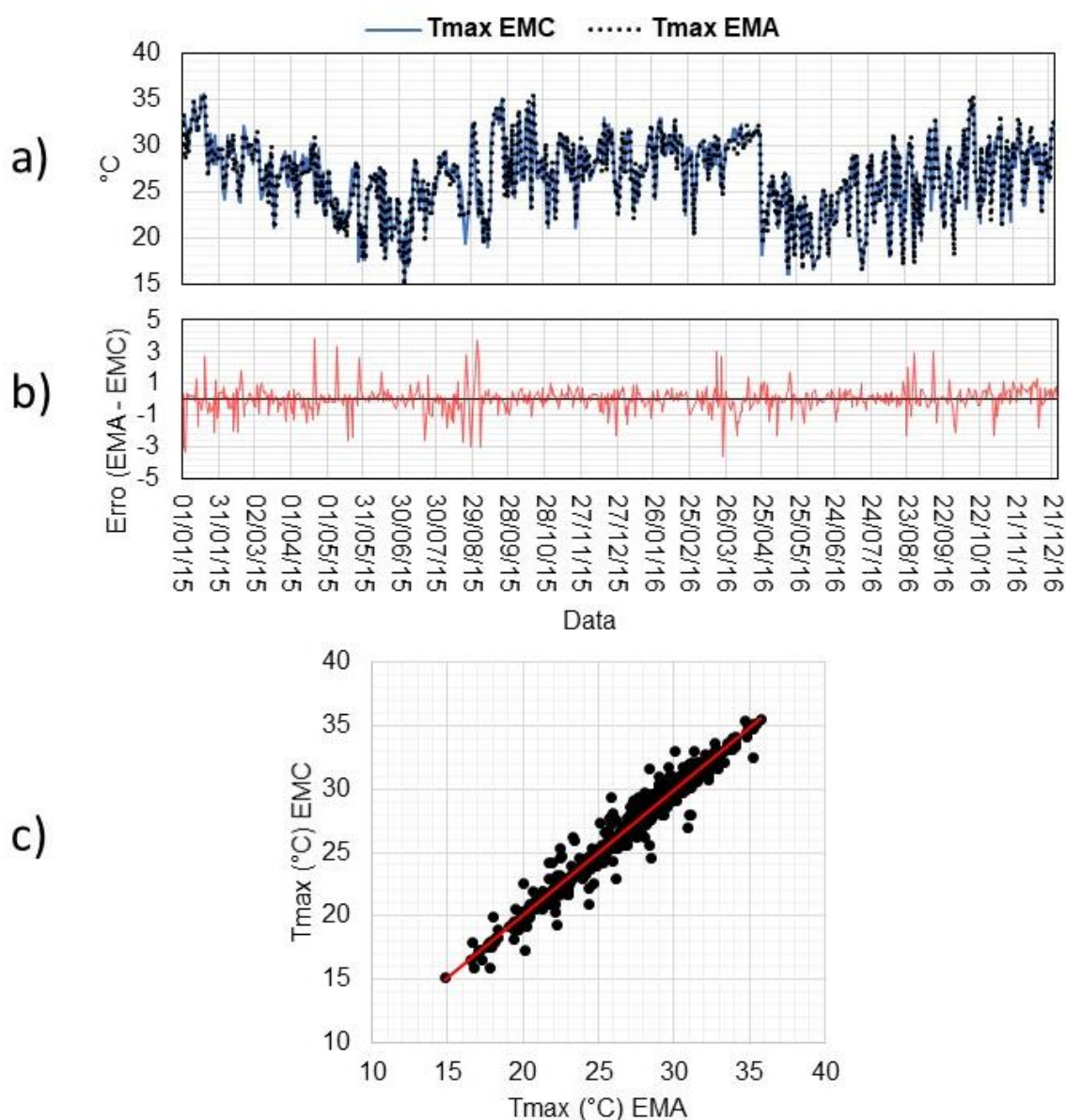
Tabela 6 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Precipitação Registrada pela EMA e Estimada pela EMC

MBE (mm)	rMBE (%)	RMSE (mm)	rRMSE (%)	r	d
-0,012	-0,020	2,529	13,909	0,991	0,995
±0,415	±2,288	±0,518	±2,892	±0,004	±0,002

4.2 Temperatura Máxima do Ar

A Figura 8a apresenta as medidas diárias da temperatura máxima do ar (Tmax) na EMC e EMA. A temperatura máxima apresentou valores próximos na estação convencional e automática em temperaturas elevadas, próximas a 35°C no verão e em menores temperaturas, perto de 15°C no inverno. Os instrumentos apresentaram grande estabilidade nas medidas entre as estações. A Figura 8b exibe o erro absoluto entre as estações meteorológicas, com baixos valores de erro durante a maioria dos dias. A Figura 8c mostra a correlação entre as medidas diárias de temperatura máxima do ar obtidas pela EMC e EMA, apresentando forte correlação positiva com pouca dispersão.

Figura 8 – Comparação da Temperatura Máxima do Ar Diário (a), Erro Absoluto (b) e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de Botucatu – São Paulo – Brasil



O termômetro de temperatura máxima do ar, composto por mercúrio apresentou boa precisão nas medidas diárias comparadas ao sensor eletrônico. A Tabela 7 apresenta os indicativos estatísticos para comparação entre as estações meteorológicas. As medidas coletadas pela EMA foram 0,091% menores que as medidas registradas pela EMC, com diferença de 0,024 °C. O erro absoluto foi de 0,780 °C (rRMSE 2,909%). Resultados apresentados por Pereira et al. (2008) mostram que a EMC subestimou as medidas da EMA em 0,37%. Ribeiro et al. (2017) obtiveram valores maiores de temperatura máxima do ar medidos pela EMA.

Sentelhas et al. (1997) e Oliveira et al. (2010) mostram que existe uma tendência dos dados coletados pela EMC serem maiores que as medidas registradas pela EMA.

Tabela 7 - Indicativos Estatísticos Para Comparação da Temperatura Máxima do ar Obtida Pela EMC e EMA

MBE (°C)	rMBE (%)	RMSE (mm)	rRMSE (%)	r	d
-0,024	-0,091	0,780	2,909	0,980	0,990

A Temperatura máxima do ar apresentou bom desempenho de 0,961 (R^2) e elevado índice de concordância 0,990 (d). Outros estudos apresentam resultados semelhantes realizados por Sentelhas et al. (1997), onde obtiveram boa correlação 0,987 (R^2) e concordância 0,987 (d). Oliveira et al. (2010) apresentaram valores próximos também, com correlação de 0,973 (R^2) e concordância de 0,97 (d). Carvalho et. al. (2019) encontraram valores menor de correlação (R^2 0,945) e maior de concordância (d 0,999).

Em seguida, foi criado um modelo para estimar os valores de temperatura máxima com medidas da EMC. A Tabela 8 apresenta os coeficientes do modelo e o intervalo de confiança, resultado na Equação 15.

Tabela 8 - Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Estimativa da Temperatura Máxima do ar pela EMC

Coeficiente	Estimativa Bootstrap Média (desvio padrão)	IC (95%) percentil	R^2
Intercepto (a)	0,578 (0,132)	[0,3137; 0,8279]	0,961
Inclinação (b)	0,979 (0,005)	[0,9706; 0,9890]	

$$T_{\max_{\text{EMA}}} = (0,979 T_{\max_{\text{EMC}}} + 0,578) \quad (15)$$

A Tabela 9 apresenta os indicativos estatísticos para validação do modelo comparando as medidas de temperatura máxima do ar da EMA com as medidas estimadas pela EMC. As medidas de registradas pela EMA foram 0,001% menores que as medidas estimadas pela EMC, com diferença de 0,001 °C. O modelo obtido

apresentou 0,778 °C de erro absoluto (rRMSE 2,900%). O modelo estimado apresentou menor MBE e rMBE, os demais indicativos tiveram resultados próximos aos encontrados pela comparação entre a EMC e EMA.

Tabela 9 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Temperatura Máxima do ar Registrada pela EMA e pela EMC

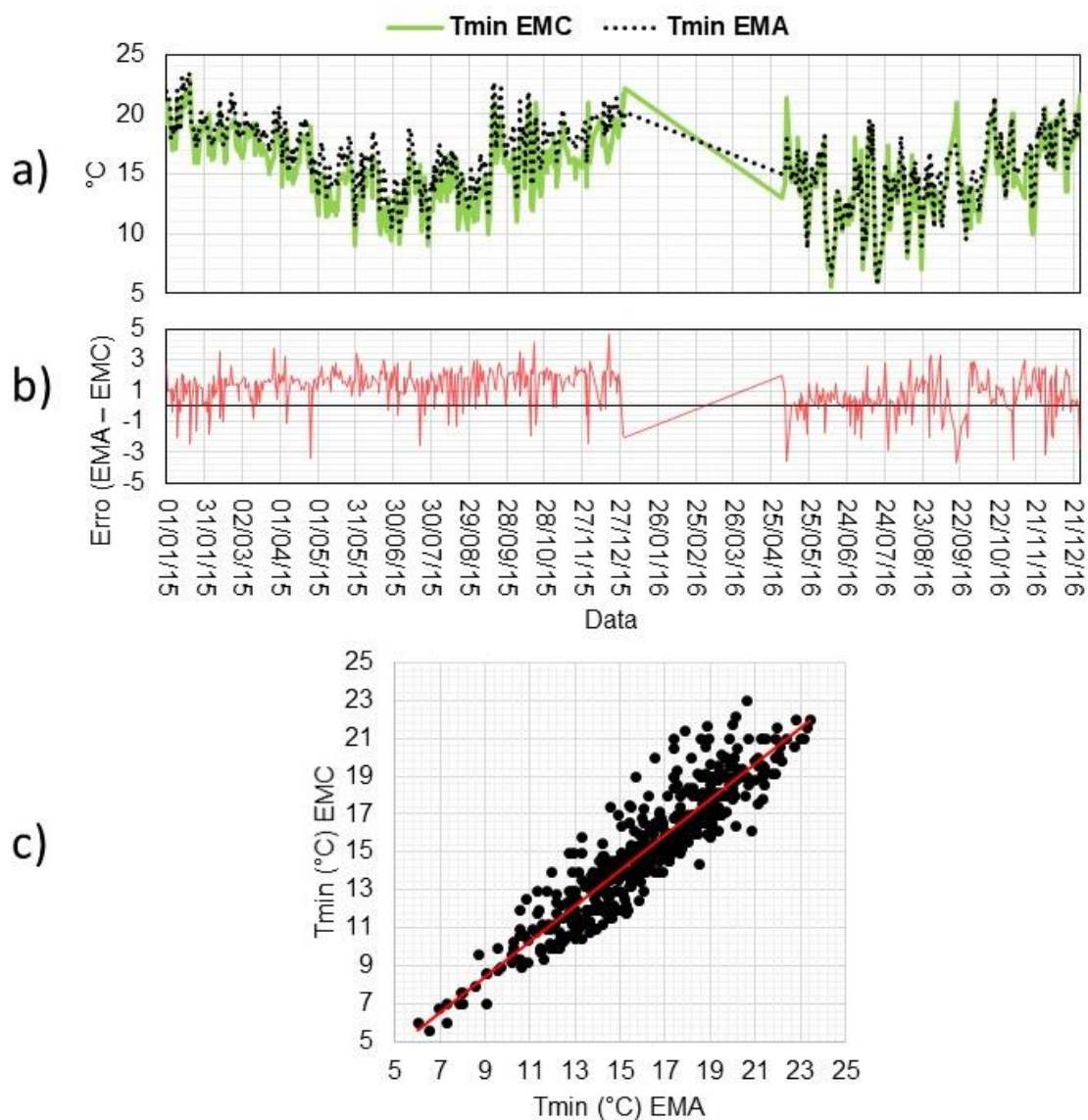
MBE (°C)	rMBE (%)	RMSE (°C)	rRMSE (%)	r	d
-0,001 ±0,067	-0,001 ±0,248	0,778 ±0,061	2,900 ±0,003	0,981 ±0,003	0,990 ±0,002

4.3 Temperatura Mínima do Ar

A Figura 9a apresenta as medidas diárias da temperatura mínima do ar (Tmin) registrada pela EMC e EMA. No intervalo de janeiro a dezembro de 2015 as medidas da EMA superestimaram as medidas da EMC. No final de dezembro de 2015 até abril de 2016 o termômetro de mínima da EMC apresentou problemas gerando medidas inconsistentes, as medidas coletadas durante esse período foram eliminadas no filtro. Após a substituição do termômetro em abril de 2016 as medidas apresentaram resultados próximos entre as estações. O valor médio da temperatura mínima do ar foi de 15,24 °C na EMC e 16,29 °C na EMA.

A Figura 9b apresenta o erro absoluto entre as estações meteorológicas, apresentando maiores valores de erro comparado a temperatura máxima do ar. A Figura 9c exibe a correlação entre as medidas diárias da temperatura mínima do ar obtida pela EMA e EMC. O gráfico apresentou correlação positiva, com grande dispersão dos pontos. A temperatura mínima foi a medida entre as temperaturas que apresentou maior espalhamento dos pontos, este espalhamento foi causado pelo mau funcionamento do termômetro de mínima da EMC.

Figura 9 – Comparação da Temperatura Mínima do Ar Diário (a), Erro absoluto (b) e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de Botucatu – São Paulo – Brasil



A Tabela 10 apresenta os indicadores estatísticos para comparar as medidas entre as estações meteorológicas. As medidas diárias de temperatura mínima do ar obtidas pela EMA foram 6,437% menores que as medidas obtidas pela EMC, com diferença de 1,049 °C. A comparação apresentou 1,650 °C de erro absoluto (rRMSE 10,120%). Resultados semelhantes foram encontrados por Sentelhas et al. (1997), Oliveira et al. (2010), Ribeiro et al. (2017) e Pereira et al. (2008) com valores maiores de temperatura mínima do ar registrados pela EMC em comparação a EMA.

Tabela 10 – Indicativos Estatísticos Para Comparação da Temperatura Mínima do ar Obtida Pela EMC e EMA

MBE (°C)	rMBE (%)	RMSE (°C)	rRMSE (%)	r	d
-1,049	-6,437	1,650	10,120	0,919	0,932

A Temperatura mínima do ar apresentou correlação de 0,844 (R^2) e alto índice de concordância (d 0,932), valores superiores foram encontrados por Sentelhas et al. (1997) com alta correlação (R^2 0,969) e concordância (d 0,990). Oliveira et al. (2010) encontraram valores maiores de correlação (R^2 0,963) e concordância (d 0,98). Carvalho et al. (2019) chegaram aos valores mais próximos de Botucatu - SP, com correlação de 0,869 (R^2) e concordância de 0,980 (d). Resultados inferiores de correlações foram encontrados por Ramos et al. (2008).

Em seguida, foi criado um modelo para estimar os valores de temperatura mínima com medidas da EMC. A Tabela 11 apresenta os coeficientes do modelo e o intervalo de confiança, resultado na Equação 16.

Tabela 11 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Criação do Modelo de Estimativa da Temperatura Mínima do ar pela EMC

Coeficiente	Estimativa Bootstrap Média (desvio padrão)	IC (95%) percentil	R^2
Intercepto (a)	2,509 (0,178)	[2,1755; 2,8480]	0,844
Inclinação (b)	0,904 (0,012)	[0,8811; 0,9277]	

$$T_{\min_{EMA}} = (0,904 T_{\min_{EMC}} + 2,509) \quad (16)$$

A Tabela 12 apresenta os indicativos estatísticos para validação do modelo comparando as medidas da EMA com as medidas estimadas pela EMC. As medidas de Temperatura mínima do ar registradas pela EMA foram 0,0017% menores que as medidas estimadas pela EMC, com diferença de 0,003 °C. O modelo obtido apresentou 1,235 °C de erro absoluto (rRMSE 7,580%). O modelo estimado apresentou menor MBE, rMBE, RMSE e rRMSE com maior (r) e (d) em relação aos valores encontrados na comparação entre a EMC e EMA.

Tabela 12 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Temperatura Mínima do ar Registrada pela EMA e Estimada pela EMC

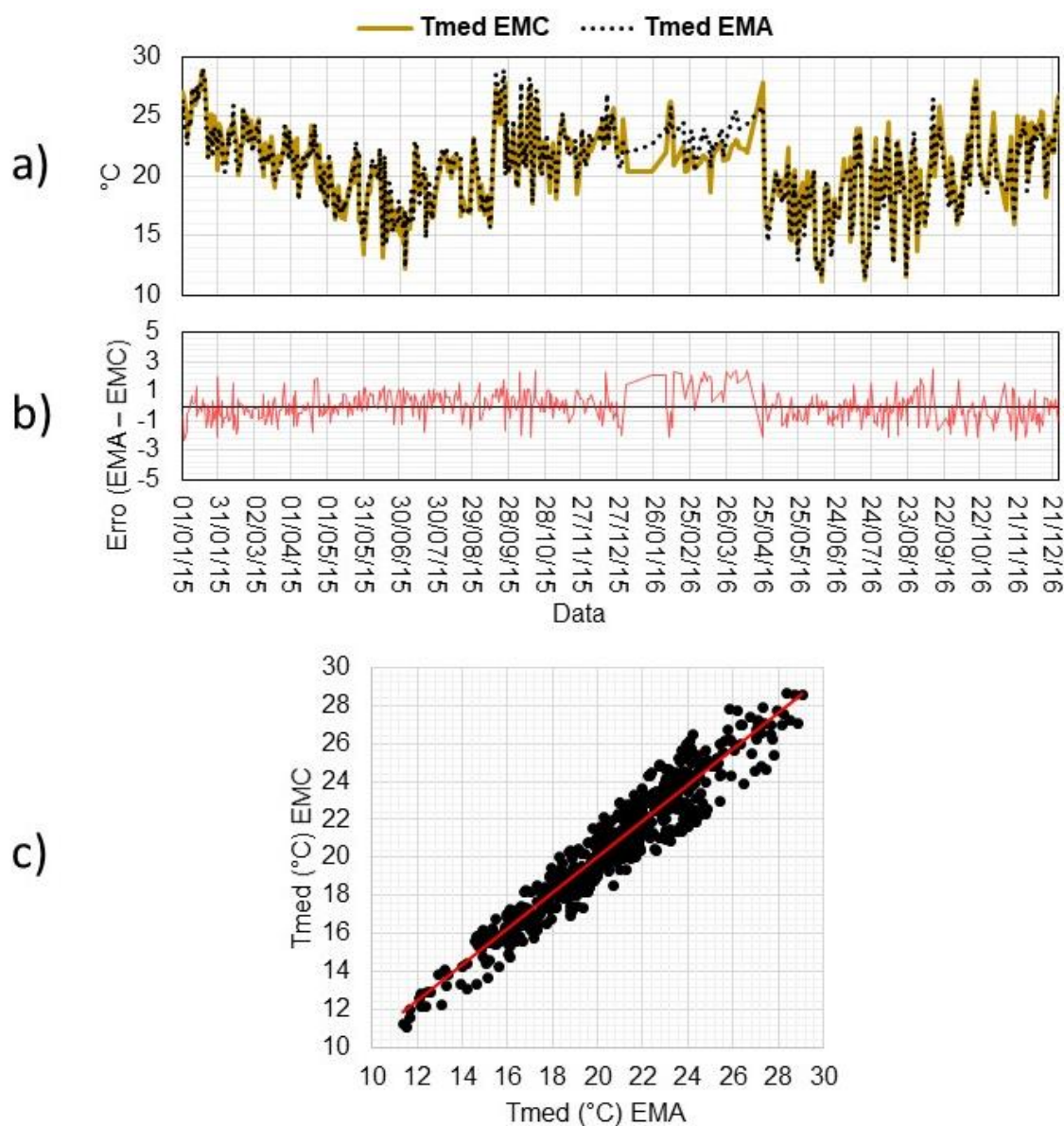
MBE (°C)	rMBE (%)	RMSE (°C)	rRMSE (%)	r	d
-0.003 ± 0,115	-0.017 ±0,704	1,235 ± 0,070	7,580 ±0,431	0,920 ±0,012	0,956 ±0,006

4.4 Temperatura Média do Ar

A Temperatura média do ar é estimada pela EMC a partir das temperaturas extremas do ar, medidas pelos termômetros de máxima e mínima (considerando apenas 2 valores). A EMA registra a medida de temperatura pelo sensor a cada 5 minutos e no final do dia é calculado a média de todas medidas (considerando as 288 medidas).

A Figura 10a apresenta as medidas diárias da temperatura média do ar (Tmed) registradas pela EMC e EMA. A temperatura média é calculada pela EMC a partir da temperatura máxima e mínima no ar, devido as falhas nas medidas da temperatura mínima, a temperatura média não apresentou bom resultado no intervalo de dezembro de 2015 a abril de 2016. Nos demais intervalos os valores apresentaram resultados próximos entre a EMC e EMA. A Temperatura média apresentou valor médio de 20,82 °C medido na EMC e 20,83°C na EMA. A Figura 10b apresente o erro absoluto entre as estações meteorológicas, apesar da utilização da temperatura mínima o volume de erros foi baixo na temperatura média. A Figura 10c exibe a correlação entre as medidas diárias da temperatura média do ar obtidas pela EMC e EMA. O gráfico apresentou uma correlação positiva, com maior espalhamento em comparação a temperatura máxima, este espalhamento ocorre por causa da temperatura mínima registrada na EMC, que apresentou falhas durante o intervalo analisado.

Figura 10 – Comparação da Temperatura Média do Ar Diário (a), Erro Absoluto (b) e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de Botucatu – São Paulo – Brasil



A Tabela 13 apresenta os indicadores estatísticos para comparar as medidas de temperatura média do ar da EMC e EMA. Os resultados informam que as medidas registradas pela EMA foram 0,080% menores que as medidas obtidas pela EMC, com diferença de 0,017 °C. O erro absoluto foi de 0,971 °C (rRMSE 4,659%). Resultados semelhantes foram encontrados Oliveira et al. (2010) e Sentelhas et al. (1997) onde é apresentada uma tendência de valores maiores registrados pela EMC. Ribeiro et al. (2017) atingiram resultados maiores registrados pela EMA no estado do PI.

Tabela 13 – Indicativos Estatísticos Para Comparação da Temperatura Média do ar Obtida Pela EMC e EMA

MBE (°C)	rMBE (%)	RMSE (°C)	rRMSE (%)	r	d
-0,017	-0,080	0,971	4,659	0,958	0,978

Em seguida, foi criado um modelo para estimar os valores de temperatura média com medidas da EMC. A Tabela 14 apresenta os coeficientes do modelo e o intervalo de confiança, resultado na Equação 17.

Tabela 14 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Criação do Modelo de Estimativa da Temperatura Média do ar pela EMC

Coeficiente	Estimativa Bootstrap Média (desvio padrão)	IC (95%) percentil	R ²
Intercepto (a)	0,641 (0,153)	[0,3451;0,9363]	0,917
Inclinação (b)	0,970 (0,007)	[0,9557; 0,9850]	

$$T_{med_{EMA}} = (0,970 T_{med_{EMC}} + 0,641) \quad (17)$$

A Temperatura média do ar apresentou bom resultado (R² 0,917) e alto índice de concordância (d 0,978). Trabalhos realizados por Sentelhas et al. (1997) obtiveram um valor maior de correlação (R² 0,953) e menor concordância (d 0,958). Oliveira et al. (2010) apresentaram valor semelhante de correlação (R² 0,968) e maior valor de concordância (d 0,99). Carvalho et. al. (2019) chegaram ao resultado mais próximos deste estudo, com correlação (R² 0,903) e concordância (d 0,989).

A Tabela 15 apresenta os indicativos estatísticos para validação do modelo comparando as medidas da EMA com as medidas estimadas pela EMC. As medidas de temperatura média do ar registradas pela EMA foram 0,042% maior que as medidas estimadas pela EMC, com diferença de 0,009 °C. O modelo obtido apresentou 0,965 °C de erro absoluto (rRMSE 4,637%). O modelo estimado apresentou menor MBE e rMBR, os demais indicativos tiveram resultados próximos aos valores encontrados na comparação entre a EMC e EMA.

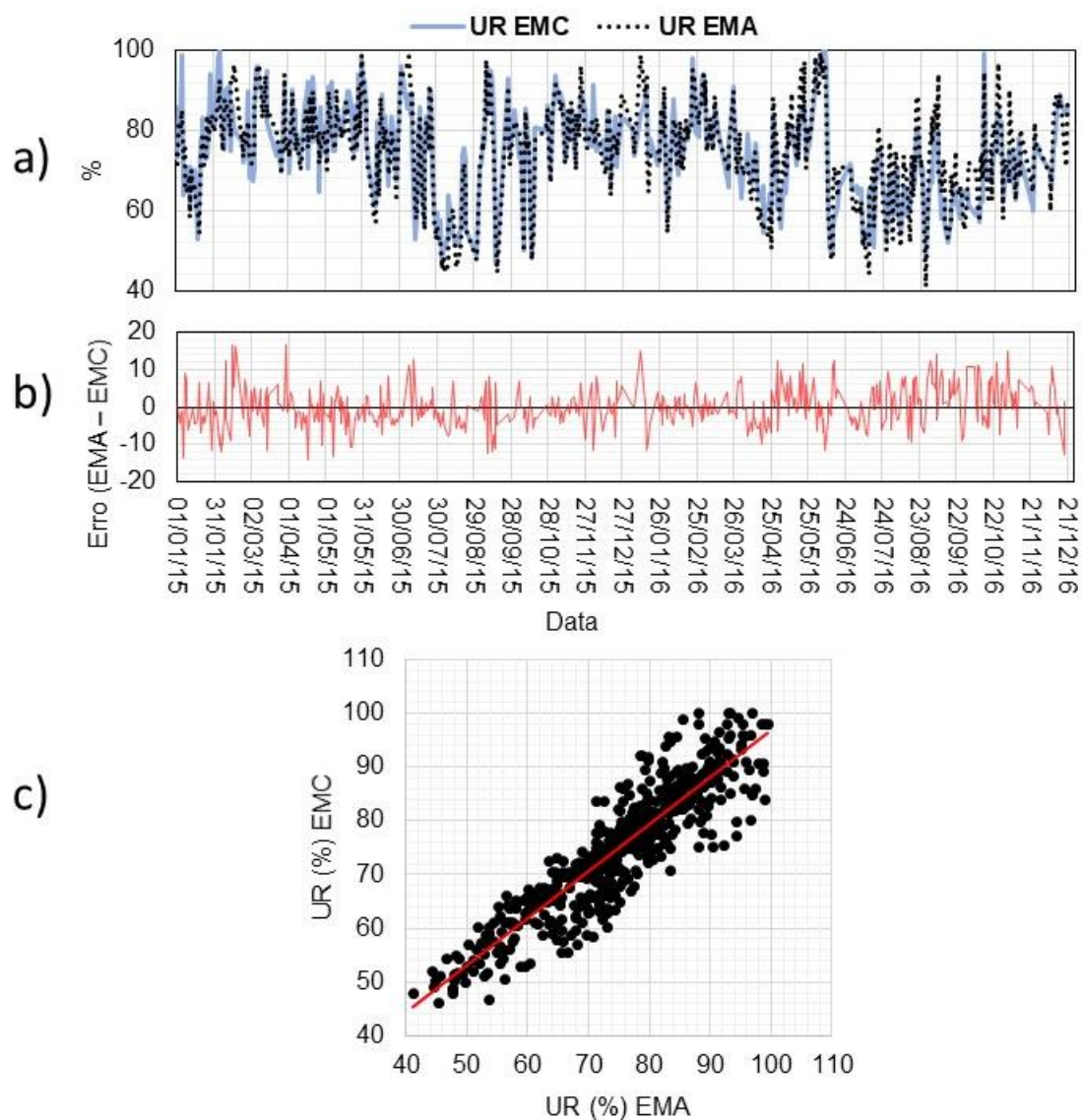
Tabela 15 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Temperatura Mínima do ar registrada pela EMA e Estimada pela EMC

MBE (°C)	rMBE (%)	RMSE (°C)	rRMSE (%)	r	d
0,009 ±0,085	0,042 ±0,410	0,965 ±0,045	4,637 ±0,215	0,958 ±0,005	0,978 ±0,003

4.5 Umidade Relativa

A Figura 11a apresenta as medidas diárias da umidade relativa média do ar (UR) registrada na EMC e EMA. As medidas apresentam uma diferença no início de janeiro de 2015 a junho de 2015. Após esse intervalo as medidas apresentaram estabilidade e semelhança na maior parte dos dias. A EMC e EMA apresentaram o mesmo valor médio na série de 74,87 %. A Figura 11b apresenta o erro absoluto entre as estações meteorológicas. A Figura 11c exibe a correlação entre as medidas diárias da umidade relativa média do ar obtida pela EMA e EMC. O gráfico apresenta correlação positiva com grande espalhamento dos pontos. Esse espalhamento é causado pela diferente sensibilidade dos instrumentos como especificado pelo fabricante o higrógrafo da EMC possui uma sensibilidade (precisão nominal) de 5% e da EMA de 0,8%. Como o higrógrafo utiliza cabelo humano como elemento sensível, com o passar dos anos esse material pode apresentar problemas em sua capacidade de expandir-se e contrair-se com a variação da umidade relativa do ar, registrando medidas incorretas.

Figura 11 – Comparação da Umidade Relativa Média do Ar Diário (a), Erro Absoluto (b) e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de Botucatu – São Paulo – Brasil



A Tabela 16 apresenta os indicadores estatísticos para comparação entre as estações meteorológicas. As medidas de umidade relativa diárias registradas pela EMA foram 0,005% menores que as medidas da EMC, com diferença de 0,003%. A comparação apresentou 5,240% de erro absoluto (rRMSE 6,700%). Estudos realizados por Sentelhas et al. (1997) e Pereira et al. (2008) encontraram valores elevados registrados na EMC em comparação a EMA. Oliveira et al. (2010) encontraram valores elevados de umidade relativa registrados pela EMA em comparação a EMC. Ribeiro et al. (2017) obteve os dois tipos de resultados em municípios do estado do PI.

Tabela 16 – Indicativos Estatísticos Para Comparação da Umidade Relativa Obtida Pela EMC e EMA

MBE (%)	rMBE (%)	RMSE (%)	rRMSE (%)	r	d
-0,003	-0,005	5,240	6,700	0,900	0,947

Em seguida, foi criado um modelo para estimar os valores da umidade relativa com medidas da EMC. A Tabela 17 apresenta os coeficientes do modelo e o intervalo de confiança, resultado na Equação 18.

Tabela 17 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Estimativa da Umidade Relativa pela EMC

Coeficiente	Estimativa bootstrap Média (desvio padrão)	IC (95%) percentil	R ²
Intercepto (a)	5.376 (0,945)	[3,4685;7,1137]	0,811
Inclinação (b)	0,928 (0,013)	[0,9046; 0,9537]	

$$UR_{EMA} = (0,928 UR_{EMC} + 5,376) \quad (18)$$

A umidade relativa foi um modelo que gerou resultados intermediários de correlação (R² 0,811) e alta concordância (d 0,947), valores superiores foram encontrados por Sentelhas et al. (1997), onde obtiveram uma correlação (R² 0,869) e concordância (d 0,960). Oliveira et al. (2010) encontraram maior correlação (R² 0,929) e concordância (d 0,94). Carvalho et. al. (2019) chegaram aos valores próximos de correlação (R² 0,892) e concordância (d 0,9436). Resultados de correlação menores foram encontrados por Ramos et al. (2008).

A Tabela 18 apresenta os indicativos estatísticos para validação do modelo comparando as medidas da EMA com as medidas estimadas pela EMC. As medidas de umidade relativa registradas pela EMA foram 0,039% menores que as medidas estimadas pela EMC, com diferença de 0,030%. O modelo obtido apresentou 5,202 mm de erro absoluto (rRMSE 6,945%). O modelo estimado apresentou maior MBE e rMBE, os demais indicativos tiveram resultados próximos aos valores encontrados na comparação entre a EMC e EMA.

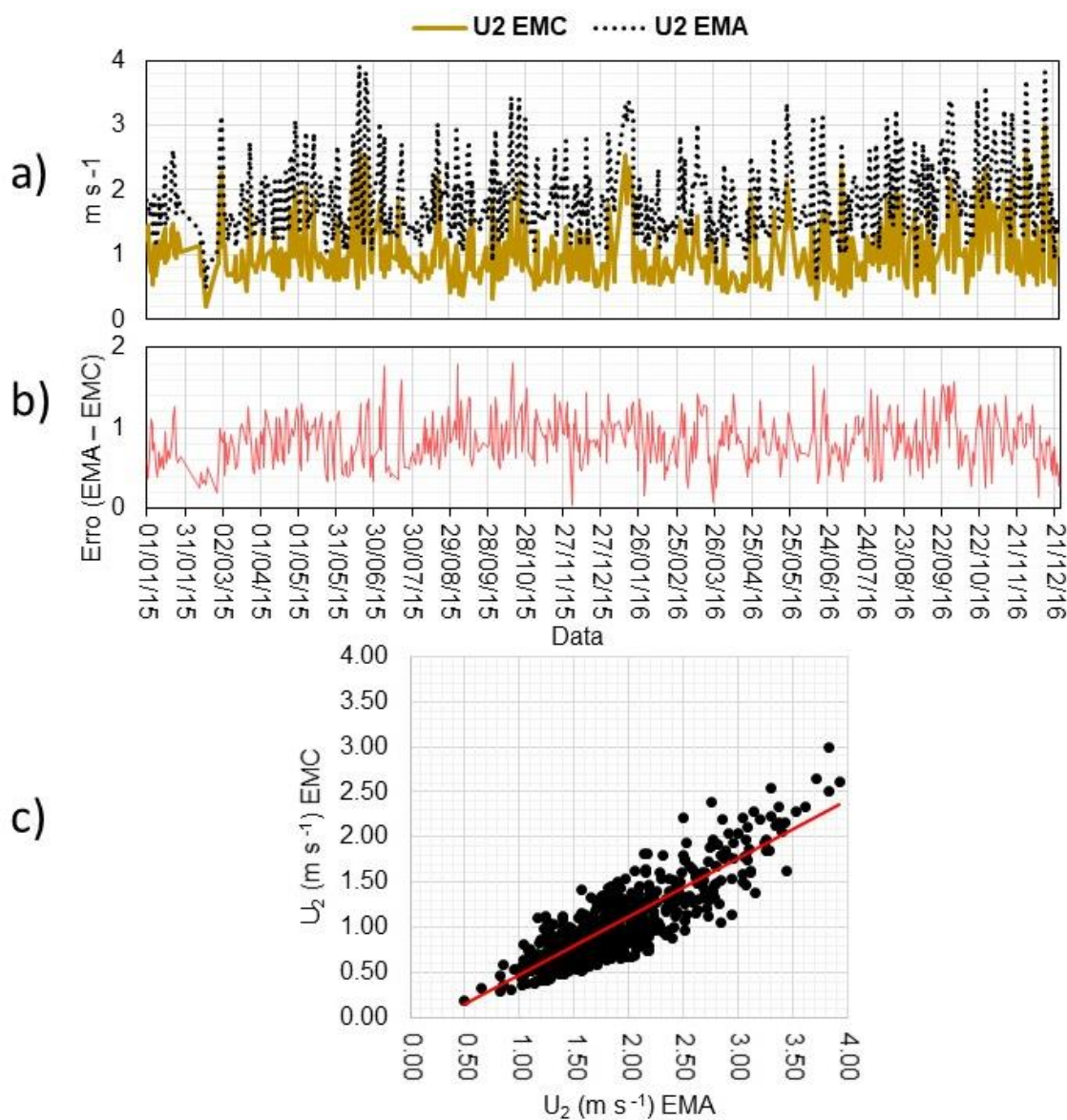
Tabela 18 – Indicativos Estatístico para Comparação da umidade Relativa registrada pela EMA e Estimada pela EMC

MBE (%)	rMBE (%)	RMSE (%)	rRMSE (%)	r	d
-0,030	-0,039	5,202	6,945	0,900	0,944
±0,446	±0,595	±0,250	±0,332	±0,011	±0,006

4.6 Velocidade do Vento

A Figura 12a apresenta as medidas diárias da velocidade do vento a 2 metros de altura registradas na EMC e EMA. As medidas obtidas pela EMA apresentaram valores maiores que as medidas registradas na EMC. O valor médio da velocidade do vento foi de $1,028 \text{ m s}^{-1}$ na EMC e $1,864 \text{ m s}^{-1}$ na EMA. A Figura 12b apresenta o erro absoluto entre as estações meteorológicas. A Figura 12c exibe a correlação entre as medidas diárias da velocidade média do vento a 2 metros de alturas (U_2) obtidas pela EMA e EMC. O gráfico apresentou uma correlação positiva com agrupamento dos pontos para velocidades próximas a $1,5 \text{ m s}^{-1}$ e maior espalhamento com o aumento da velocidade do vento. Essa diferença ocorre pela sensibilidade na composição dos sensores, como especificado pelo fabricante o anemômetro da EMC possui uma sensibilidade (precisão nominal) de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ e da EMA de $0,12 \text{ m s}^{-1}$. Outro fator a ser considerado é a manutenção do instrumento convencional ao passar do tempo referente a lubrificação do eixo que pode afetar a rotação.

Figura 12 – Comparação da Velocidade Média do Vento Diário (a), Erro Absoluto e Correlação entre a EMC e EMA (b) para o Município de Botucatu – São Paulo – Brasil



A Tabela 19 apresenta os indicativos estatísticos comparação entre as estações meteorológicas. As medidas diárias de velocidade do vento registradas na EMA apresentaram menores valores de 44,860% em relação as medidas registradas pela EMC, com diferença de $0,836 m s^{-1}$. O modelo apresentou $0,891 m s^{-1}$ de erro absoluto (rRMSE 47,785%). Pereira et al. (2008) obtiveram valores superestimados pela EMA de 5,4% em comparação a EMC. Ribeiro et al. (2017) informam que os maiores valores foram registrados pela EMA em apenas um município e nos outros cinco municípios analisados a EMC apresentou maiores valores.

Tabela 19 – Indicativos Estatísticos para Comparação da Velocidade do Vento Obtida pela EMC e EMA

MBE (m s ⁻¹)	rMBE (%)	RMSE (m s ⁻¹)	rRMSE (%)	r	d
-0,836	-44.860	0,891	47,785	0.864	0.605

Em seguida, foi criado um modelo para estimar os valores de velocidade do vento com medidas da EMC. A Tabela 20 apresenta os coeficientes do modelo e o intervalo de confiança, resultado na Equação 19.

Tabela 20 – Valor Médio e Desvio Padrão Gerados pelo Bootstrap e Validação Cruzada para Estimativa da Velocidade do vento pela EMC

Coeficiente	Estimativa Bootstrap Média (desvio padrão)	IC (95%) percentil	R ²
Intercepto (a)	0,670 (0,016)	[0,6392;0,7002]	0,746
Inclinação (b)	1,161 (0,017)	[1,1298;1,1946]	

$$U_{2EMA} = (1,161 U_{2EMC} + 0,670) \quad (19)$$

A velocidade média do vento apresentou correlação de 0,746 (R²) com menor desempenho em comparação as demais variáveis analisadas e alto índice de concordância de 0,922 (d). Resultados encontrados por Ribeiro et al. (2017) obtiveram correlação de 0,71 (R²). Carvalho et. al. (2019) apresentam resultados menores de correlação (R² 0,3293) e alta concordância (d 0,9523).

A Tabela 21 apresenta os indicativos do modelo de estimativa dos dados da EMC. As medidas de velocidade do vento registradas pela EMA foram 0,102% menores que as medidas estimadas pela EMC, com diferença de 0,002 m s⁻¹. O modelo obtido apresentou 0,299 m s⁻¹ de erro absoluto (rRMSE 16,052%). O modelo estimado apresentou menor MBE, rMBR. RMSE e rRMSE com maior valor de (d) referente aos valores encontrados na comparação entre a EMC e EMA.

Tabela 21 – Indicativos Estatístico para Comparação da Velocidade do Vento registrada pela EMA e Estimada pela EMC

MBE (m s⁻¹)	rMBE (%)	RMSE (m s⁻¹)	rRMSE (%)	r	d
-0,002	-0,102	0,299	16,052	0,864	0,922
±0,023	±1,257	±0,013	±0,693	±0,017	±0,009

5 CONCLUSÕES

Foram possíveis obter as seguintes conclusões do estudo:

- A filtragem das medidas coletadas pela EMC e EMA pelo DR permitiu um controle de qualidade sobre as medidas, eliminando dados errôneos relacionados ao mal funcionamento dos instrumentos no processo de aquisição, que também é sujeito a falha humana e eletrônica.
- Os métodos bootstrap e validação cruzada (K-Fold) foram um diferencial nesta pesquisa, possibilitando a separação dos dados aleatoriamente em 70% para criação do modelo e 30% para validação. A utilização do laço de 1000 repetições apresentou bom resultado de desvio padrão referente a média para todos os elementos analisados.
- A precipitação foi o elemento que apresentou melhor correlação, no entanto, devido a utilização apenas de dias com ocorrência de chuva, foi o elemento com menor número de medidas. A temperatura máxima foi o elemento com maiores números de medidas que apresentou melhor resultado. Seguido pela temperatura média que apresentou menor correlação devido a temperatura mínima, causada pelo mal funcionamento do termômetro de mínima da EMC. A umidade relativa apresentou menor valor de correlação devido a diferença de sensibilidade na composição dos instrumentos. A velocidade do vento foi o elemento que obteve a correlação mais baixa, em vários estudos analisados este elemento não apresentou bons resultados.
- Todos os elementos apresentaram pouca diferença entre as medidas registradas pela EMC e EMA, apesar da diferença entre as tecnologias presentes em cada instrumento.
- A EMC necessita de acompanhamento diariamente de um observador meteorológico, pois a qualidade das medidas depende deste trabalho. Devido aos instrumentos serem muito antigos não é possível a realização de calibrações com instrumentos de referência, como é realizado na EMA anualmente. Outro fator importante é a falta de instrumentos convencional para substituição em caso de necessidade. Muitos instrumentos com funcionamento mecânico estão ultrapassados, impossibilitando a realização

de manutenção, o que torna necessária a migração dos instrumentos e da série de dados para a EMA.

- A criação do modelo de regressão linear simples permitiu gerar a equação para estimar os dados da EMA com referência nos dados da EMC, permitindo a criação de uma série de dados única e homogênea de 1971 até o início de operação da EMA em 2015.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. F; BECKER, A. C. A. F. Análise comparativa dos dados meteorológicos nas estações automáticas e convencionais do INMET em Brasília – DF. ES. In: **XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 2011.
- ALMEIDA, H. A; HERMENEGIDIO, G. M. S. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estações meteorológicas convencional e automática. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 12, jan. – jul. 2013.
- ALMEIDA, H. A; SOUZA, J. A; ALCÂNTARA, H. M. Análise comparativa de dados de temperatura do ar obtidos por estações meteorológicas convencional e automática, SE. In: **XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Aracaju. 2007.
- ARENALES, S. DAREZZO, A. **Cálculo Numérico: Aprendizagem com Apoio de Software**. São Paulo: Thomson Learning, 2008.
- 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.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, **HC2S3-L**, 2021. Disponível em: <https://www.campbellsci.com.br/hc2s3>. Acesso em: 04 de julho de 2021.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introdução a hidrologia**. IPH UFRGS. 2008. Acesso em: 02 de junho de 2021. Disponível em: <https://docplayer.com.br/34594967-Introduzindo-hidrologia.html>.
- CUNHA, A. R; MARTINS, D. Estudo comparativo entre elementos meteorológicos obtidos em estações meteorológicas convencional e automática em Botucatu, SP, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 103-111, 2004.
- 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.
- FUNARI, F. L.; PEREIRA FILHO, A. J. Análise comparativa de medições de variáveis meteorológicas realizadas por estações meteorológicas convencional e automática instaladas no parque estadual das fontes do Ipiranga - São Paulo – SP. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 7, abr. - set. 2009.
- GALINA, M. H.; VERONA, J. A. **Fontes de observações meteorológicas no estado de São Paulo**. Estudos Geográficos, Rio Claro, v. 2, n. 1, p. 107-118, jul. 2004.
- IBGE. Brasil / São Paulo / Botucatu. **Cidades: IBGE, 2019**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 28 fev. 2021.

INCAPER, **Descomplicando a Meteorologia - Como são ou devem ser feitas as observações de uma das variáveis meteorológicas mais conhecidas - a temperatura?**. 2018. Disponível em: https://meteorologia.incaper.es.gov.br/noticia-2018_05_08. Acesso em 03 de julho de 2021.

LEITE, R. **Introdução a Validação-Cruzada: K-Fold**. 2020. Disponível em: <https://drigols.medium.com/introdu%C3%A7%C3%A3o-a-valida%C3%A7%C3%A3o-cruzada-k-fold-2a6bced32a90>. Acesso em 20 de junho de 2021.

LIMA, E. F. et al Comparação de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática e estimativa da evapotranspiração de referência em Imperatriz/MA. **Journal of Environmental Analysis and Progress**. v. 05, n. 02, p. 214-220, 2020.

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

OLIVEIRA, A. D. et al. comparação de dados meteorológicos obtidos por estação Convencional e automática em jaboticabal-SP. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 4, p. 108-114, out. - dez. 2010.

PEREIRA, L. M. P. et al. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Londrina – PR. Semina: **Ciências Agrárias, Londrina**, v. 29, n. 2, p. 299-306. Abr. - jun. 2008.

RAMOS, H. E. A. et al. Avaliação comparativa de dados meteorológicos obtidos em estações convencionais e automáticas, localizadas em três municípios do estado do espírito santo. In: **XV Congresso Brasileiro De Meteorologia**, 2008, São Paulo - SP. ANAIS DO XV Congresso Brasileiro De Meteorologia, 2008.

RANIERO, M. R. **Suncounter: programa computacional para contagem automatizada de horas de brilho solar registradas por heliógrafos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.

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.

RIBEIRO, A. A. et al. Comparação entre dados meteorológicos obtidos por estações convencionais e automáticas no estado do Piauí, Brasil. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 2, p. 220-235, abr. - jun. 2017.

RINCÓN. A. et al. Bias correction of global irradiance modelled with weather and research forecasting model over Paraguay. **Solar Energy**, v. 170, p. 201-211, 2018.

RIZZO. A. L. T, CYMROT. R, Utilização da técnica de reamostragem bootstrap em aplicação na engenharia de produção. Paraíba, **X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba**. 2006.

ROHANI, A.; TAKI, M.; ABDOLLAHPOUR, M. A novel soft computing model (Gaussian process regression with K-fold cross validation) for daily and monthly solar radiation forecasting (Part: I). **Renewable Energy**, v. 115, p. 411- 422, 2018.

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.

SENTELHAS, P.C. et al. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por Estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 215-221, 1997.

SILVA, F. M; CHAVES, M. S; LIMA, Z. M. C. **Sistema de coleta de dados meteorológicos**, Paraíba, UEPB, 2009.

SMAABC. São Paulo, **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico**. 2002.

Disponível em:

https://sma.fundacaoabc.org/climatologia/classificacao_climatica/sao_paulo. Acesso em: 20 ago. 2020.

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, 2011.

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.

VIANELLO, R. L. **A estação meteorológica e seu observador**. 2011. INMET.

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

APÊNDICE A - Script desenvolvido em R para criação e validação dos modelos

```
##Limpa todas as variáveis e objetos utilizados anteriormente
```

```
rm(list=ls());
```

```
##Limpa todos os comandos digitados anteriormente
```

```
cat("\014");
```

```
##Leitura dos dados
```

```
setwd("C:\\Users\\mathe\\Dropbox\\Trabalhos José e Matheus\\Comparação EMC x  
EMA\\Outros"); #Note
```

```
require(xlsx);
```

```
var = "Chuva"; #Variável a ser analisada! (Nome da planilha)
```

```
dados = read.xlsx(file = "Todas_variaveis.xlsx", sheetIndex = var, header = TRUE);
```

```
#####C  
OMPARAÇÃO
```

```
##VALIDAÇÃO DO MODELO
```

```
o = dados$EMA;
```

```
p = dados$EMC;
```

```
n = length(o);
```

```
ob = mean(o);
```

```
pb = mean(p);
```

```
mbe = sum((p - o)/n);
```

```
rMBE = (mbe/ob)*100;
```

```
rmse = sqrt( sum( ( p - o)^2 )/n );
```

```
rRMSE = (rmse/ob)*100;
```

```
r = ( sum( (p - pb)*(o - ob) ) )/( sqrt( ( sum((p - pb)^2) )*( sum((o - ob)^2) ) ) );
```

```
idc = 1 - (sum( (p - o)^2 ) / sum( (abs(p - ob) + abs(o - ob))^2 )); #Índice de concordância
```

```
#Indicativo MBE
```

```
mbe;
```

```
#Indicativo rMBE
```

```
rMBE;
```

```
#Indicativo RMSE
```

```
rmse;
```

```
#Indicativo rRMSE
```

```
rRMSE;
```

```
#Coeficiente de correlação
```

```
r;
```

```
#Índice de concordância
```

```
idc;
```

```
#####M  
ODELAGEM (Criar e validar o modelo)
```

```
library(tidyverse);
```

```
library(caret);
```

```
theme_set(theme_bw());
```

```
##DEFINE O NÚMERO DE REPETIÇÕES
```

```
v = 1000;
```

```
##VETORES COM 1000 POSIÇÕES
```

```
a = rep(0, times = v); #Valores do coeficiente a
```

```
sigA = rep(0, times = v); #Valores de significância do coeficiente a
```

```
nSigA = rep(0, times = v); #Número de vezes que o coeficiente a foi significante
```

```
b = rep(0, times = v); #Valores do coeficiente b
```

```
sigB = rep(0, times = v); #Valores de significância do coeficiente b
```

```
nSigB = rep(0, times = v); #Número de vezes que o coeficiente b foi significante
```

```
r2 = rep(0, times = v); #Valores do coeficiente de determinação
```

```
mbe = rep(0, times = v); #Valores do indicativo MBE
```

```
rMBE = rep(0, times = v); #Valores do indicativo rMBE
```

```
rmse = rep(0, times = v); #Valores do indicativo RMSE
```

```
rRMSE = rep(0, times = v); #Valores do indicativo rRMSE
```

```
r = rep(0, times = v); #Valores do coeficiente de correlação
```

```
idc = rep(0, times = v); #Valores do índice de concordância
```

```
for (i in 1:v){
```

```
    amostragem = dados$EMA %>% createDataPartition(p = 0.7, list = FALSE);
```

```
    dadosTrei = dados[amostragem, ];
```

```
    dadosVali = dados[-amostragem, ];
```

```
##TREINAMENTO DO MODELO
```

```
EMC = dadosTrei$EMC;
```

```
EMA = dadosTrei$EMA;
```

```
modelo = summary(lm(EMA ~ EMC)); ##Modelo com coeficiente linear e angular ( $y = a + bx$ )
```

```
a[i] = modelo$coefficients[1, 1];
```

```
sigA[i] = modelo$coefficients[1, 4];
```

```

nSigA[i] = if (sigA[i] < 0.05) 1 else 0;
b[i] = modelo$coefficients[2, 1]
sigB[i] = modelo$coefficients[2, 4];
nSigB[i] = if (sigB[i] < 0.05) 1 else 0;
r2[i] = modelo$adj.r.squared;

##VALIDAÇÃO DO MODELO
o = dadosVali$EMA;
p = a[i] + b[i]*dadosVali$EMC; ##Modelo y = a + bx

n = length(o);
ob = mean(o);
pb = mean(p);

mbe[i] = sum((p - o)/n);
rMBE[i] = (mbe[i]/ob)*100;
rmse[i] = sqrt( sum( ( p - o)^2 )/n ) );
rRMSE[i] = (rmse[i]/ob)*100;
r[i] = ( sum( (p - pb)*(o - ob) ) )/( sqrt( ( sum((p - pb)^2 )*( sum((o - ob)^2) ) ) );
idc[i] = 1 - (sum( (p - o)^2 ) / sum( (abs(p - ob) + abs(o - ob))^2 )); #Índice de concordância
}

##RESULTADO DO TESTE DE 1000X (mean = média; sd = desvio-padrão)

#Coeficiente a
mean(a);
sd(a);
quantile(a, c(.025, .975))

#Significância do coeficiente a
mean(sigA);

```

```
sd(sigA);
```

```
#Porcetagem de vezes que o coeficiente a foi significativo
```

```
sum(nSigA)/v*100;
```

```
#Coeficiente b
```

```
mean(b);
```

```
sd(b);
```

```
quantile(b, c(.025, .975))
```

```
#Significância do coeficiente b
```

```
mean(sigB);
```

```
sd(sigB);
```

```
#Porcetagem de vezes que o coeficiente b foi significativo
```

```
sum(nSigB)/v*100;
```

```
#Coeficiente de determinação
```

```
mean(r2);
```

```
sd(r2);
```

```
#Indicativo MBE
```

```
mean(mbe);
```

```
sd(mbe);
```

```
#Indicativo rMBE
```

```
mean(rMBE);
```

```
sd(rMBE);
```

```
#Indicativo RMSE
```

```
mean(rmse);
```

```
sd(rmse);
```

```
#Indicativo rRMSE
```

```
mean(rRMSE);
```

```
sd(rRMSE);
```

```
#Coeficiente de correlação
```

```
mean(r);
```

```
sd(r);
```

```
#Índice de concordância
```

```
mean(idc);
```

```
sd(idc);
```