Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ATUALIZAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NO ESTADO DO MARANHÃO

Update of the climate classification and climate water balance in the state of Maranhão

Actualización de la clasificación del clima y balance hídrico climático en el estado de Maranhão

Wellington Cruz Corrêa
Centro de Ciências de Chapadinha (CCCh), Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
wellingtoncruz156@gmail.com

Marcus Willame Lopes Carvalho
Centro de Ciências de Chapadinha (CCCh), Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
marcus.willame@ufma.br

Telmo José Mendes
Centro de Ciências de Chapadinha (CCCh), Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
engtelmo@yahoo.com.br

Resumo: O conhecimento do clima e a quantificação do balanço hídrico de um local ou região são de extrema importância para o planejamento da produção na agricultura, pecuária, gestão de recursos hídricos, dimensionamento de obras urbanas e rurais, além de sua aplicação no entendimento geográfico e ecológico. Este trabalho tem como objetivo atualizar a classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado do Maranhão pelos métodos de classificação climática de Köppen e Thornthwaite e balanço hídrico proposto por Thornthwaite & Mather com base nos dados de séries temporais de temperatura do ar e precipitação pluvial média mensal da rede de estações meteorológicas do INMET, adotando-se uma capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) de 100 mm. Com base na classificação climática de Köppen foram determinados para o Estado do Maranhão três tipos climáticos, sendo estes Aw, Aw' e Am, com os dois primeiros caracterizados como clima tropical de savana e o terceiro como clima tropical de monção. Pela classificação climática de Thornthwaite os tipos climáticos determinados foram C1dA'a', C1sA'a', C1wA'a', C1w2A'a', C2wA'a', C2w2A'a' e B1wA'a'. A região Norte do Estado é mais úmida em relação às demais, com valores de precipitação pluvial anual superando os 2.200 mm.

Palavras-chave: Climatologia. Séries temporais. Temperatura do ar. Evapotranspiração. Regime hídrico.

Abstract: Knowledge of the climate and quantification of the water balance of a place or region are extremely important for planning production in agriculture, livestock, management of water resources, dimensioning of urban and rural works, in addition to its application in geographic understanding and ecological. This work aims to update the climate classification and climatological water balance in the State of Maranhão using the Köppen and Thornthwaite climate classification methods and the water balance proposed by Thornthwaite & Mather based on data from time series of air temperature and monthly average rainfall. of INMET's network of meteorological stations, adopting a soil water storage capacity (CAD) of 100 mm. Based on the Köppen climate classification, three climate types were determined for the State of Maranhão, these being Aw, Aw' and Am, with the first two characterized as tropical savannah climate and the third as tropical monsoon climate. According to the Thornthwaite climate classification, the climate types determined were C1dA'a', C1sA'a', C1wA'a', C1w2A'a', C2wA'a', C2w2A'a' and B1wA'a'. The northern region of the state is wetter compared to the others, with annual rainfall values exceeding 2,200 mm.

Keywords: Climatology. Time series. Air temperature. Evapotranspiration. Water regime.

Resumen: El conocimiento del clima y la cuantificación del balance hídrico de un lugar o región son de suma importancia para la planificación de la producción en agricultura, ganadería, manejo de recursos hídricos, dimensionamiento de obras urbanas y rurales, además de su aplicación en el conocimiento geográfico y ecológico. Este trabajo tiene como objetivo actualizar la clasificación climática y el balance hídrico climatológico en el Estado de Maranhão utilizando los métodos de clasificación climática de Köppen y Thornthwaite y el balance hídrico propuesto por Thornthwaite & Mather con base en datos de series temporales de temperatura del aire y precipitación media mensual del INMET. red de estaciones meteorológicas, adoptando una capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CAD) de 100 mm. Con base en la clasificación climática de Köppen, se determinaron tres tipos de clima para el Estado de Maranhão, siendo estos Aw, Aw' y Am, siendo los dos primeros caracterizados como clima tropical de sabana y el tercero como clima tropical monzónico. Según la clasificación climática de Thornthwaite, los tipos de clima determinados fueron C1dA'a', C1sA'a', C1wA'a', C1w2A'a', C2wA'a', C2w2A'a' y B1wA'a'. La región norte del estado es más húmeda en comparación con las demás, con valores de precipitación anual que superan los 2.200 mm.

Palabras clave: Climatología. Series de tiempo. Temperatura del aire. Evapotranspiración. Régimen hídrico.

Submetido em: 26/01/2023
Aceito para publicação em: 19/04/2023
Publicado em: 25/04/2023

1. INTRODUÇÃO

O uso racional da água vem se tornando cada vez mais importante em decorrência da constante demanda por este recurso natural, sobretudo na agropecuária. O conhecimento da distribuição espacial e temporal da disponibilidade hídrica torna possível implementar diretrizes em prol da incorporação de políticas de gestão deste recurso (HORIKOSHI; FISCH, 2007; SANTOS *et al.*, 2010).

Dantas *et al*. (2007, p. 1862), enfatizam que "a relação cultura/clima deve ser o objetivo dos estudos de balanço hídrico, de modo que seja feito um ajuste do cultivo com base nas condições climáticas, apresentando ainda aplicações para a definição de zoneamentos agroclimáticos, irrigações adicionais, hidrologia, dimensionamento de reservatórios, drenagem, dentre outras."

Para a contabilização de água no solo, isto é, a computação das entradas e saídas de água no sistema, de forma simples, dá-se o nome de Balanço Hídrico Climático (BHC) (SILVA; BRACHT, 2010). Os trabalhos percursores que deram início aos estudos de balanço hídrico foram elaborados por Thornthwaite (1948) e Thornthwaite; Mather (1955). Por meio do BHC elaborado por Thornthwaite; Mather (1955) é possível acompanhar a variação do armazenamento de água no solo, seja na escala diária ou mensal, utilizando como ponto de partida a temperatura média do ar e a precipitação pluvial (VAREJÃO-SILVA, 2006). A temperatura do ar e a precipitação podem ser assumidas como os elementos mais importantes do clima, uma vez que estas revelam os níveis energéticos e as disponibilidades hídricas da região (ROLIM *et al.*, 2007; CUNHA; MARTINS, 2009).

Neste sentido, as classificações climáticas elaboradas por Köppen (1931) e Thornthwaite (1948) são duas das mais utilizadas mundialmente (KUINCHTNER; BURIOL, 2001; PEREIRA *et al.,* 2007; ROLIM *et al.,* 2007; SOUZA *et al.,* 2013; ALVARES *et al.,* 2013). A classificação de Köppen tem como base as características térmicas e a distribuição sazonal das chuvas, ao passo que a de Thornthwaite baseia-se essencialmente nos índices de umidade e eficiência térmica (KUINCHTNER; BURIOL, 2001; SOUZA *et al.,* 2013). Ambas as classificações são de grande aplicabilidade em estudos relacionados a agricultura, recursos hídricos e ecologia (AYOADE, 2007).

No ano de 2002 o Núcleo Geoambiental (NUGEO) e Laboratório de Geoprocessamento (LABGEO) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) publicaram a classificação climática

para o Estado do Maranhão com base no método proposto por Thornthwaite (1948). Mais recentemente, Alvares *et al.* (2013) realizaram a classificação climática para o Brasil pelo método de Köppen (1936), obtendo, obviamente, a classificação para o Maranhão, utilizando uma série histórica de dados entre os anos de 1950 e 1990. Existem 14 estações meteorológicas convencionais da rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instaladas no Maranhão. 12 destas estações contam com um período de dados superior à normal climatológica (30 anos). Com advento das estações meteorológicas automáticas o Estado ganhou mais 17 estações, passando a grande maioria destas a operar a partir do ano de 2008.

É de grande importância obter e atualizar os conhecimentos a respeito das características climáticas do Estado do Maranhão, considerando a sua escassez na literatura, e, mais ainda, por sua aplicação na agricultura, agropecuária, gestão de recursos hídricos, geografia, ecologia, etc. Assim, objetivou-se com este estudo, atualizar a classificação climática e determinar o balanço hídrico climatológico para doze municípios do Estado do Maranhão com base nos métodos propostos por Thornthwaite e Köppen.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e obtenção dos dados

O Maranhão localiza-se entre as coordenadas 0,9° S e 10,47° S e 48,89° W e 41,68° W, ocupando uma área de 329.651,496 km² (sendo a oitava maior unidade federativa do Brasil, representando 21,24% da região Nordeste e 3,87% do território brasileiro). Para o ano de 2021 a população estimada foi de 7.153.262 habitantes, com densidade demográfica de 21,70 hab.Km^{-2} (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2022). O Estado conta com a presença dos Biomas Amazonas e Cerrado, além de possuir o segundo maior litoral do país, com praias e manguezais, o que resulta numa gama imensa de diversidade de ecossistemas, situações sociais, econômicas, culturais e de processos de produção e desenvolvimento rural, marinho e agroindustrial.

O estudo foi elaborado a partir dos dados obtidos das 12 Estações Meteorológicas Convencionais (EMC's) da rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Ainda, utilizou-se os dados de três EMC's do Estado do Piauí por estas

estarem instaladas próximas da divisa política entre os Estados do Maranhão e Piauí (Tabela 1) e que podem ser representativas das condições climáticas do Estado. Para a representatividade das diferentes regiões do Zoneamento Econômico Ecológico do Estado do Maranhão implementou-se a distribuição espacial das EMC's (Figura 1).

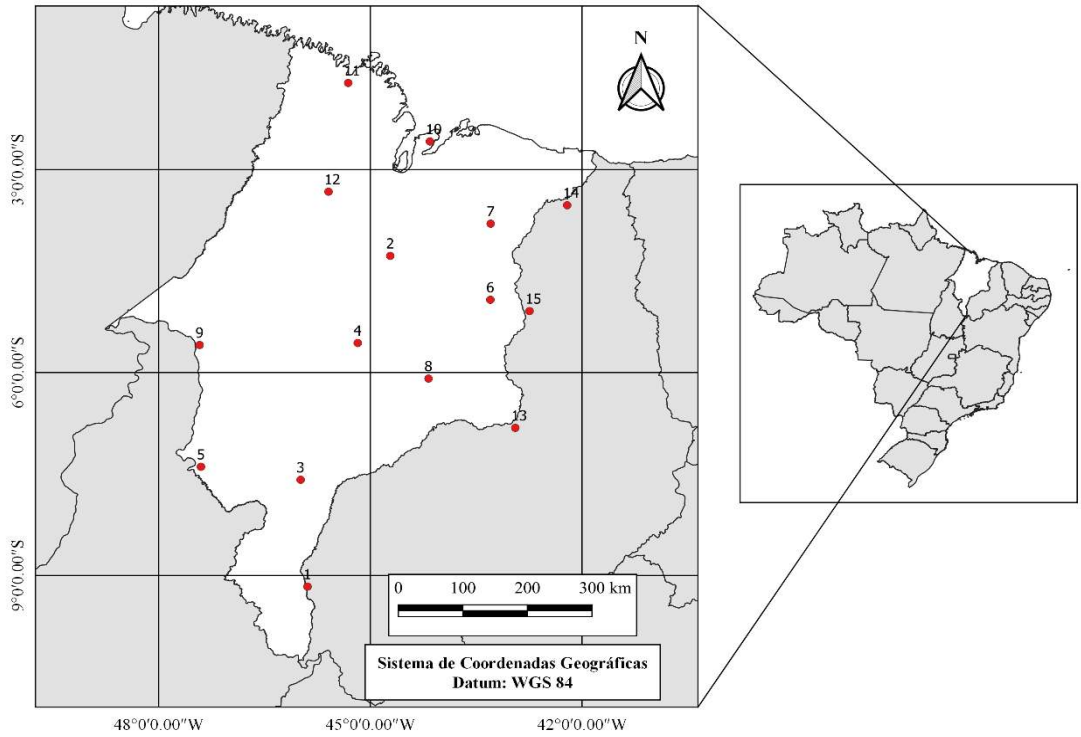
Tabela 1 - Dados das estações meteorológicas convencionais avaliadas no estudo.

Cód. OMM[(1)]	Estações	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período dos dados
82970	1. Alto Parnaíba	9°06'30"S	45°56'55"W	285,1	1996-2021
82460	2. Bacabal	4°13'05"S	44°46'33"W	26,6	1996-2021
82768	3. Balsas	7°31'46"S	46°02'47"W	154,2	1991-2021
82571	4. Barra do Corda	5°30'23"S	45°14'14"W	263,5	1990-2021
82765	5. Carolina	7°20'14"S	47°27'35"W	182,9	1990-2021
82476	6. Caxias	4°52'02"S	43°21'24"W	96,7	1995-2021
82382	7. Chapadinha	3°44'33,6"S	43°21'07,5"W	104,0	1996-2021
82676	8. Colinas	6°01'59"S	44°13'60"W	175,6	1997-2021
82564	9. Imperatriz	5°32'11"S	47°28'43"W	126,3	1991-2021
82280	10. São Luiz	2°31'36"S	44°12'49"W	32,6	1990-2021
82198	11. Turiaçu	1°39'41"S	45°22'19"W	34,5	1998-2021
82276	12. Zé Doca	3°16'09,2"S	45°39'03,6"W	46,7	1990-2021
82678	13. Floriano*	6°45'41"S	43°00'12"W	126,6	2002-2021
82296	14. Luzilândia*	3°28'11"S	42°16'05"W	44,1	1995-2021
82578	15. Teresina*	5°02'05"S	42°48'05"W	75,7	2002-2021

*Municípios localizados na divisa política entre os Estados do Maranhão e Piauí. [(1)] Código da Organização Meteorológica Mundial (OMM). **Fonte:** INMET (2022).

A aquisição dos dados foi feita considerando o maior período dos dados possível sem a ocorrência de um grande número de falhas para cada estação analisada no estudo. Para o preenchimento de falhas no conjunto de dados das EMC's, utilizou-se a base de dados das estações meteorológicas automáticas (EMA's) da rede do INMET. Também, utilizou-se dados de precipitação pluvial obtidos a partir do banco de dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), assim como dados de temperatura do ar do banco de dados do Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária (SISDAGRO), desenvolvido pelo INMET e dados calculados por modelos de previsão numérica do tempo - Modelo COSMO (do inglês, *Consortium for Small-scale Modeling*) - com resolução horizontal de 7 km (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2022). Ressalta-se que os dados de precipitação do CEMADEN só foram utilizados pelo fato de os pluviômetros serem instalados em locais bem próximos das estações meteorológicas do INMET.

Figura 1 - Mapa de localização e distribuição espacial das estações meteorológicas convencionais da rede do INMET, no Estado do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os dados das EMA's podem ser utilizados no preenchimento de falhas dos dados das EMC's uma vez que estas estações estão instaladas basicamente nas mesmas coordenadas geográficas e seus dados registrados são aproximadamente iguais. Foram feitas análises de correlação pelo software Excel do pacote Office da Microsoft e obteve-se coeficientes de correlação superiores a 98% na maioria das vezes entre os dados das EMC's e EMA's. Estudos de comparações entre dados de EMC's e EMA's localizadas em um mesmo local foram realizados por Souza *et al.* (2003), Pereira *et al.* (2008), Oliveira *et al.* (2010), Strassburger *et al.* (2011) e Almeida e Hermenegídio (2013), sendo constatado pequenas diferenças entre os dados obtidos pelos dois modelos de estações meteorológicas. Cabe destacar que os dados das EMA's também continham falhas, porém, em menor quantidade e, que na maioria das vezes não coincidiam com as datas das falhas nas EMC's.

2.2. Balanço hídrico climatológico

O balanço hídrico climatológico foi contabilizado empregando-se o método proposto por Thornthwaite; Mather (1955), utilizando-se uma Capacidade de Água Disponível no solo (CAD) de 100 mm, a qual, segundo Pereira *et al*. (2007, p. 93), "é conveniente aplicá-la tanto para culturas anuais quanto perenes, uma vez que o BHC é contabilizado em função da(s) cultura(s) cultivada na área e/ou região e não em função das características do solo como a textura, por exemplo." Considerou-se os dados médios mensais de precipitação e temperatura de cada ano ao logo dos intervalos de tempos estudados. Em seguida, determinou-se a evapotranspiração potencial ETP usando o método de Thornthwaite, conforme considerações feitas por Pereira *et al*. (1997). Inicialmente, quantificou-se a evapotranspiração potencial padrão (ETPp, em mm/mês) usando-se a fórmula empírica:

a) Se: 0 < Tn < 26,5 °C

(1) $$ETPp = 16\left(10\frac{Tn}{I}\right)^{a}$$

b) Se: Tn≥26,5 °C

(2) $$ETPp = -415{,}85 + 32{,}24Tn - 0{,}43Tn^{2}$$

Onde: "Tn" é a temperatura média no mês "n", em °C; e "I" trata-se de um índice que expressa o nível de calor da região. Os meses do ano são indicados pelo subscrito "n", isto é, n=1 é o mês de janeiro; n=2 é o mês de fevereiro, até n=12, mês de dezembro.

"I" tem seu valor dependente da temperatura ao longo do ano e integra o efeito térmico de cada mês, o qual é obtido através da fórmula:

(3) $$I = 12(0{,}2Ta)^{1{,}514}$$

Onde: "Ta" é a temperatura média anual.

O expoente "α" (da Equação 1) também é um índice que expressa o nível de calor da região, pois este é função de "I", determinado pela fórmula:

(4) $a = 6{,}75x10^{-7}I^3 - 7{,}71x10^{-5}I^2 + 1{,}7912x10^{-2}I + 0{,}49239$

A ETPp expressa o total mensal de evapotranspiração que aconteceria dentro das condições térmicas de um mês padrão de 30 dias, com cada dia contendo 12 horas de fotoperíodo (N). Nas condições reais sabe-se que nem todos os meses possuem 30 dias e nem todos os dias contam com 12 horas de fotoperíodo, com este último variando em função da latitude do local. Com isso, deve-se corrigir a ETPp com base no número de dias do período (NDP) em questão e no fotoperíodo (N). Para isto, utilizou-se valores tabelados de fator de correção (Cor) encontrados na literatura (PEREIRA *et al*., 2007, p. 82) para cada mês do ano, com base na latitude do local em que se encontra instaladas as estações meteorológicas.

Prosseguindo-se, a partir da elaboração do BHC, determinou-se a evapotranspiração real (ETR), o armazenamento de água no solo (ARM), deficiência hídrica (DEF) e o excedente hídrico (EXC), em escala mensal (PEREIRA *et al.,* 2002) e finalizando com a representação gráfica dos balanços hídricos climatológicos para cada estação meteorológica em estudo.

2.3. Classificações climáticas

Utilizou-se dados de temperatura do ar e precipitação pluvial de séries temporais (conforme consta na Tabela 1) para efetuar as avalições das classificações climáticas de Köppen (1931) e de Thornthwaite (1948). Para isto, foram determinadas a temperatura média anual, temperatura média do mês mais quente e mais frio, precipitação pluvial média anual, precipitação pluvial máxima de verão e de inverno, e o mês que contou com a maior e menor precipitação. Com base nas definições de solstícios e equinócios foram caracterizadas as estações de verão e inverno.

A classificação climática pelo método de Köppen possui como base a qualificação de diferentes regiões, tipos e variedades climáticas, conforme pode ser visualizado a partir da Tabela 2: indicador de grupo – primeira letra, maiúscula; indicador de tipo – segunda letra, minúscula; e indicador de subtipo.

Tabela 2 – Chaves da classificação climática de Köppen.

Caracterização do indicador de grupo climático		
Código	**Tipo de clima**	**Descrição**
A	Tropical	Climas megatérmicos: TMA no mês mais frio > 18 °C; estação invernosa ausente; Pa superior a ETa.
B	Árido	Climas secos (Pa < 500 mm): ETa > a Pa; Inexistência de cursos d'água permanente.
C	Temperado	Climas mesotérmicos: TMA no mês mais frio entre -3 e 18 °C (considerando a mínima média); TMA no mês mais quente > 10°C; estações de verão e inverno bem definidas.
D	Continental	Climas microtérmicos: TMA no mês mais frio < -3 °C; TMA no mês mais quente > 10 °C; estações de verão e inverno bem definidas.
E	Glacial	Climas polares e de alta montanha: TMA no mês mais quente < 10°C; estação de verão pouco definida ou inexistente.

Caracterização do indicador de tipo climático		
Código	**Descrição**	**Grupo**
S	clima das estepes: 380 < PAM < 760 mm.	B
W	clima desértico: PAM < 250 mm.	B
f	clima úmido: ocorrência de precipitação em todos os meses do ano; inexistência de estação seca definida; PMMS > 60 mm.	A-C-D
w	chuvas de verão.	A-C-D
s	chuvas de inverno.	A-C-D
w'	chuvas de verão e outono.	A-C-D
s'	chuvas de outono e inverno, com verão seco.	A-C-D
m	clima de monção: PAM > 1500 mm e PMMS< 60 mm.	A
T	TMA no mês mais quente entre 0 e 10°C.	E
F	TMA no mês mais quente < 0°C.	E
M	precipitação abundante (inverno pouco rigoroso).	E
Caracterização do indicador de subtipo climático		
a	VQ: TMA no mês mais quente > 22°C.	C-D
b	VT: TMA no mês mais quente < 22°C; TMA nos 4 meses mais quentes > 10°C.	C-D
c	VCF: TMA no mês mais quente < 22°C; TMA > 10°C em menos de 4 meses; TMA no mês mais frio > -38°C.	C-D
d	IMF: TMA no mês mais frio <- 38°C.	D
h	ISQ: TMAA > 18°C; deserto ou semideserto quente (TMAA > ou = a 18°C).	B
K	ISF: TMAA > 18°C; deserto ou semideserto quente (TMAA < ou = a18°C).	B

TMA: temperatura média do ar; Pa: precipitação anual; ETa: evapotranspiração anual; PMA: precipitação anual média; PMMS: precipitação do mês mais seco; VQ: verão quente; VT: verão temperado; VCF: verão curto e fresco; IMF: inverno muito frio; ISQ: inverno seco e quente; ISF: inverno seco e frio; TMAA: temperatura média anual do ar. **Fonte:** Adaptado de Souza *et al*. (2013).

As bases para a classificação climática pelo método de Thornthwaite (1948), de acordo com Ayoade (2007) e Pereira *et al*. (2007) são (Tabela 3): o índice de umidade, o índice de aridez e hídrico, variações térmicas e a evapotranspiração potencial de verão e anual.

Tabela 3 – Chaves da classificação climática de Thornthwaite.

Tipos climáticos com base no índice de umidade (Iu)	
Tipo de clima	**Índice de umidade (Iu)**
A – superúmido	Iu≥ 100
B_4 – úmido	80≤Iu<100
B_3 – úmido	60≤ Iu
B_2 – úmido	40≤Iu< 60
B_1 – úmido	20≤Iu<40
C_2 – subúmido	0≤Iu<20
C_1 – subúmido seco	-33,3≤Iu<0
D – semiárido	-66,7≤Iu<-33,3
E – árido	-100≤Iu<-66,7
Subtipos climáticos com base no índice de aridez (Ia)	
Climas úmidos (A, B_4, B_3, B_2, B_1, C_2)	**Índice de aridez (Ia)**
r – sem ou com pequena deficiência hídrica	0≤Ia<16,7
s – deficiência hídrica moderada no verão	16,7≤Ia< 33,3
w – deficiência hídrica moderada no inverno	16,7≤Ia< 33,3
s_2 – grande deficiência hídrica no verão	Ia≥ 33,3
w_2 – grande deficiência hídrica no inverno	Ia≥ 33,3
Subtipos climáticos com base no índice hídrico (Ih)	
Climas secos (C_1, D, E)	**Índice hídrico (Ih)**
d – excedente hídrico pequeno ou nulo	0≤Ih< 10
s – excedente hídrico moderado no inverno	10 ≤Ih< 20
w – excedente hídrico moderado no verão	10 ≤Ih< 20
s_2 – grande excedente hídrico no inverno	Ih≥ 20
w_2 – grande excedente hídrico no verão	Ih≥ 20

Tipos climáticos com base na evapotranspiração anual (índice térmico)		**Subtipos climáticos com base na relação entre a ETP de verão e anual**	
Tipos	**ETP anual (mm)**	**Subtipos**	**(ETP de verão/ETP anual) *100**
A' – megatérmico	ETP≥1140	a'	menor que 48,0%
B'_4 – mesotérmico	1140>ETP≥997	b'_4	entre 48,0% e menos que 51,9%
B'_3 – mesotérmico	997>ETP≥885	b'_3	entre 51,3% e menos que 56,3%
B'_2 – mesotérmico	885>ETP≥712	b'_2	entre 56,3% e menos que 61,6%
B'_1 – mesotérmico	712>ETP≥570	b'_1	entre 61,6% e menos que 68,0%
C'_2 – microtérmico	570>ETP≥427	c'_2	entre 68,0% e menos que 76,3%
C'_1 – microtérmico	427>ETP≥285	c'_1	entre 76,3% e menos que 88,0%
E' – gelo perpétuo	ETP<997	d'	igual ou maior que 88,0%
D' – tundra	287>ETP≥142		
E' – gelo perpétuo	ETP<142		

Fonte: Adaptado de Ayoade (2007) e Pereira *et al*. (2007).

Pelo método de Thornthwaite (1948), para as avaliações da classificação climática, na sequência da obtenção do BHC conforme Thornthwaite; Mather (1955), deve-se avaliar os índices de aridez (Ia), o hídrico (Ih) e o de umidade (Iu) mencionados acima na Tabela 3, conforme as fórmulas:

(6) $$Ih = \frac{EXC}{ETP}100$$

(7) $$Ia = \frac{DEF}{ETP}100$$

(8) $$Iu = Ih - 0{,}6Ia$$

Onde: EXC é o excesso hídrico, em mm; DEF a deficiência hídrica, em mm; ETP a evapotranspiração potencial, em mm. Provenientes da contabilização do BHC.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Comportamento da temperatura do ar

Para as 15 estações meteorológicas convencionais analisadas as temperaturas médias anuais variaram entre 26,3 e 28,4 °C, com a menor em Alto Parnaíba e, a maior em Floriano, respectivamente (Tabela 4). Com relação aos meses, constata-se a tendência de temperaturas mais altas entre agosto e dezembro (período seco) e menores entre fevereiro e abril (período chuvoso). Pelo fato de o vapor d'água possuir um alto potencial de atenuação da radiação na atmosfera, no período chuvoso tem-se uma diferença menor entre as temperaturas noturnas e diurnas, sendo a temperatura máxima mais amenizada em função das alterações nas radiações direta e difusa com a maior presença de nebulosidade (SANTOS *et al*., 2013).

Para as estações localizadas mais ao norte do Maranhão, foram encontrados valores menores de amplitude térmica anual (1,4 a 2,0 °C, São Luís, Turiaçu e Zé Doca), enquanto para as outras estações foram verificadas maiores amplitudes térmicas anuais (2,3 a 4,7 °C). Isso pode ser explicado, pela influência dos corpos hídricos sobre a temperatura de um local ou região que aumenta à medida que a distância entre ambos diminui, em função das diferenças básicas que existem entre as características térmicas das superfícies continentais e hídricas, com a primeira sofrendo aquecimentos e resfriamentos de forma mais rápida, tendo as regiões costeiras uma menor amplitude térmica diária, mensal ou anual em relação às regiões mais interiores (AYOADE, 2007).

Na Tabela 4 estão em destaque as maiores e menores temperaturas médias para cada estação ao longo do período analisado. Observa-se que o mês de outubro foi o que contou com a maior quantidade de temperaturas médias máximas dentre as 15 estações. Por outro

lado, o mês de março foi o que contou com uma maior quantidade de temperaturas médias mínimas. Ao longo do ano, as maiores médias de temperaturas constatadas foram paras os meses de agosto a dezembro, respectivamente, 27,8°C; 28,8°C; 29,0°C; 28,4°C e 27,8 °C. Na Tabela 5 são apresentadas as médias de temperaturas para séries temporais curtas de 5 anos.

Tabela 4 - Temperaturas médias mensais e anuais (em °C) no Estado do Maranhão.

Est.	Meses												Média anual
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
1.	26,0	25,9	26,0	26,3	26,2	25,1	24,8	25,9	27,9	28,3	27,1	26,5	26,3
2.	27,2	26,9	27,0	27,2	27,7	27,7	27,7	28,4	29,2	29,3	29,1	28,4	28,0
3.	25,9	25,9	26,2	26,6	27,0	26,8	26,7	28,0	29,4	28,8	27,1	26,5	27,1
4.	26,3	25,9	25,9	26,2	26,2	26,0	26,2	27,5	28,8	28,9	28,2	27,3	27,0
5.	26,1	26,1	26,3	26,7	27,1	27,1	27,4	28,7	29,5	28,1	27,0	26,5	27,2
6.	27,3	26,8	26,6	26,8	27,0	26,9	27,2	28,3	29,8	30,4	29,9	29,0	28,0
7.	26,8	26,4	26,2	26,4	26,7	26,7	26,8	27,5	28,2	28,6	28,6	28,1	27,3
8.	26,2	26,1	26,1	26,3	26,3	25,9	26,0	27,1	28,7	29,1	28,0	27,1	26,9
9.	26,6	26,6	26,6	26,9	27,4	27,5	27,5	28,6	29,1	28,8	27,9	27,3	27,6
10.	26,8	26,5	26,3	26,4	26,7	26,6	26,4	26,7	27,2	27,5	27,7	27,7	26,9
11.	27,1	26,7	26,4	26,5	26,9	26,8	26,7	27,1	27,5	27,9	28,1	27,9	27,1
12.	26,8	26,4	26,4	26,7	27,1	27,0	26,9	27,5	28,0	28,3	28,4	27,9	27,3
13*.	27,2	26,8	26,7	27,1	27,5	27,6	28,1	29,4	30,9	31,4	29,8	28,3	28,4
14*.	27,6	27,1	26,8	26,8	27,3	27,3	27,6	28,4	29,1	29,7	29,7	29,1	28,0
15*.	27,2	26,6	26,4	26,5	26,9	26,7	26,9	27,8	29,2	30,1	29,7	28,7	27,7

Est.: Estações; 1: Alto Parnaíba; 2: Bacabal; 3: Balsas: 4: Barra do Corda; 5: Carolina: 6: Caxias; 7: Chapadinha; 8: Colinas; 9: Imperatriz; 10: São Luís; 11: Turiaçu; 12: Zé Doca; 13: Floriano; 14: Luzilândia; 15: Teresina.
*Municípios localizados na divisa política entre os Estados do Maranhão e Piauí. **Fonte dos dados:** estações meteorológicas do INMET. **Elaboração:** os autores (2022).

Constatou-se uma considerável variação na temperatura do ar, com diferenças (entre máximos e mínimos considerando um período de cinco anos) mais destacadas paras as estações de Barra do Corda, Balsas e Carolina, sendo estes valores 2,01; 1,28; 1,18 °C (Tabela 5). Para a maioria das estações avaliadas, exceto a de Floriano-PI, observou-se tendências de aumento da temperatura média anual ao longo do período avaliado. Segundo Souza *et al.* (2013, p. 38), "as metodologias utilizadas para a definição das classificações climáticas e balanço hídrico climatológico podem mostrar um indicativo das tendências climáticas (temperatura do ar média, por exemplo) da região caso aplicadas a séries temporais menores."

Tabela 5 - Temperaturas médias de séries temporais de cinco anos (em °C) no Estado do Maranhão.

Estações	Séries temporais curtas (5 anos)					
	1990-1994	**1995-1999**	**2000-2004**	**2005-2009**	**2010-2014**	**2015-2019**
Barra do Corda	26,1	26,2	26,7	27,2	27,3	28,2
Carolina	26,5	26,9	27,2	27,4	27,4	27,7
São Luís	26,5	26,8	26,8	26,9	27,2	26,9
Zé Doca	26,9	27,3	27,1	27,7	27,6	27,6
Caxias	-	27,6	28,0	28,1	28,3	28,0
Luzilândia*	-	27,8	28,6	28,1	27,5	28,1
	1991-1995	**1996-2000**	**2001-2005**	**2006-2010**	**2011-2015**	**2016-2020**
Balsas	26,4	26,7	27,0	27,1	27,7	27,6
Imperatriz	27,2	27,2	27,8	27,8	27,7	27,7
Alto Parnaíba	-	26,0	26,3	26,2	26,6	26,8
Bacabal	-	27,8	28,0	28,1	28,3	28,1
Chapadinha	-	27,0	27,1	27,2	27,5	27,5
	1992-1996	**1997-2001**	**2002-2006**	**2007-2011**	**2012-2016**	**2017-2021**
Colinas	-	26,5	26,7	26,8	27,2	27,3
Floriano*	-	-	28,3	28,2	29,0	28,2
Teresina*	-	-	27,6	27,3	28,0	27,9
	1988-1992	**1993-1997**	**1998-2002**	**2003-2007**	**2008-2012**	**2013-2017**
Turiaçu	-	-	27,0	27,2	27,0	27,5

*Municípios localizados na divisa política entre os Estados do Maranhão e Piauí. **Fonte dos dados:** estações meteorológicas do INMET. **Elaboração:** os autores (2022).

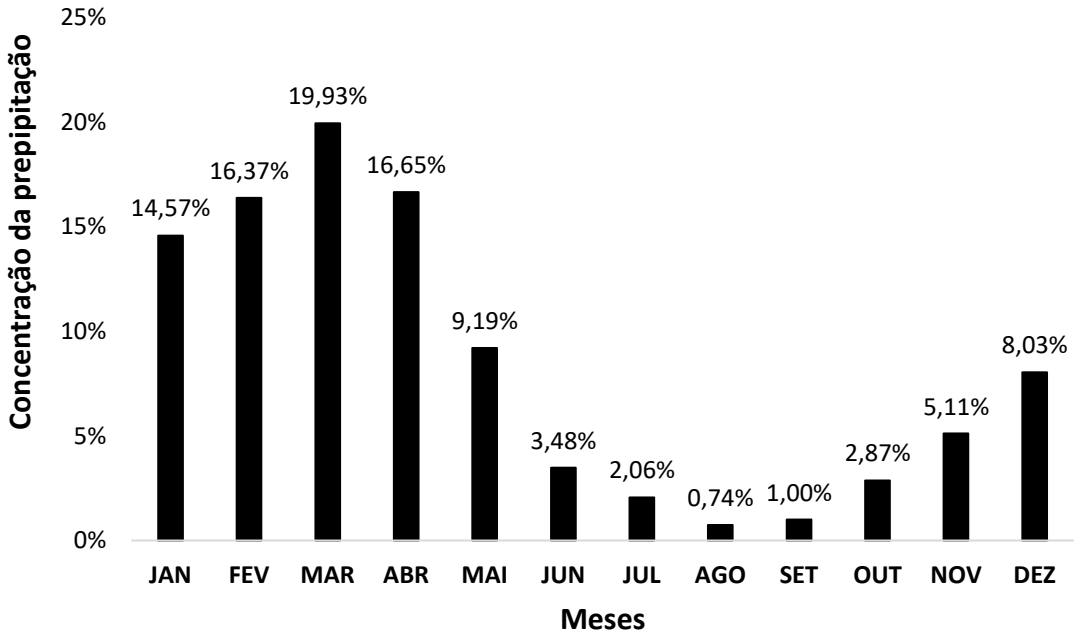
Vários trabalhos mostram as evidências relativas aos efeitos das mudanças climáticas regionais, especialmente nas variações de temperatura do ar (DANTAS *et al.,* 2007; BLAIN *et al*., 2009; BLAIN, 2010; SOUZA *et al*., 2013). No entanto, Souza *et al*., (2013, p. 38) enfatizam que, "sendo as séries temporais menores do que a normal climatológica (30 anos), não é conveniente atribuir possíveis causas a fenômenos como El Niño/Oscilação Sul, aquecimento global, alteração climática cíclica, atividades antrópicas, dentre outras, para as tendências constatadas". Streck *et al*. (2011, p. 781-782), reiteram que a "identificação desses ciclos, no tocante à agricultura, é muito importante por permitir elaborar estratégias de adaptação e mitigação".

3.2. Comportamento da precipitação e evapotranspiração

Para as estações localizadas no extremo Norte do Estado (São Luís e Turiaçu) verifica-se as maiores concentrações (entre 53,67 e 56,07%) das precipitações nos meses de março, abril e maio; nas estações situadas nas regiões Meio Norte e Leste do Estado as maiores

concentrações (entre 49,03 e 53,81%) se dão nos meses de janeiro, fevereiro e março; para as estações localizadas nas regiões Central, Sudeste, Sul e Sudoeste do estado, as precipitações se concentram (entre 55,83 e 60,24%) mais nos meses de fevereiro, março e abril. É essencial determinar o trimestre mais chuvoso, porque a efetividade da precipitação depende da sua ocorrência quando a determinação da aptidão agrícola das terras é o objetivo considerado (BRASIL, 1969). Referente às precipitações totais anuais, estas variaram entre 1.040,7 a 2.204,5 mm (Tabela 6). Na Figura 2 encontram-se a concentração da precipitação pluvial para o Estado do Maranhão de janeiro a dezembro, com destaque para o trimestre fevereiro, março, abril, que conta com a maior concentração de chuvas, ao passo que o trimestre julho, agosto, setembro, com a menor concentração, respectivamente. Resultados semelhantes a respeito da distribuição da chuva no Estado do Maranhão foram encontrados por Maranhão (2002).

Figura 2 - Concentração da precipitação pluvial de janeiro a dezembro no Estado do Maranhão.



Fonte: os autores (2022).

Ao longo de todo o ano, a dinâmica das chuvas na região norte do Nordeste brasileiro é regida pela ZCIT (MOLION; BERNARDO, 2002; REBOITA *et al*., 2012), definindo o período chuvoso quando esta se encontra na sua posição mais austral (~3° S) (REBOITA *et al*., 2016), originando uma faixa de nuvens de chuvas entre fevereiro a maio sobre essa região

(MARANHÃO, 2002; REBOITA *et al*., 2016). O período seco acontece quando a ZCIT se dirige para o norte do equador geográfico, causando movimentos subsidentes no Nordeste (REBOITA *et al*., 2016). Ainda, tanto a convergência da brisa terrestre quanto a da brisa marítima com os ventos alísios contribuem para ocorrência de precipitações no litoral do norte do Nordeste (KOUSKY, 1980; TEIXEIRA, 2008). A atividade convectiva local é muito importante para o acontecimento de precipitação, tendo o poder de influenciar o desenvolvimento de complexos convectivos de mesoescalas, podendo estes causar chuva intensa (REBOITA *et al*., 2016), e ainda a altitude e a distância ao litoral que exibem sua influência na distribuição das chuvas, especialmente na região sul do Maranhão (MARANHÃO, 2002).

As variações pluviométricas totais mensais e anuais das chuvas se dão em função do comportamento da circulação atmosférica regional no decorrer do ano, aliada a fatores geográficos locais ou regionais (PEREIRA *et al*., 2002). Alguns dos sistemas e elementos atmosféricos causadores de chuva no Nordeste e consequentemente no Estado do Maranhão são: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007); Perturbações Ondulatórias dos Alísios (POAs) (MOLION; BERNARDO, 2000); as Linhas de Instabilidade (LI) (FERREIRA; MELLO, 2005); fenômenos oceânicos como El Niño/Oscilação Sul e La Niña (DINIZ *et al*., 2008); e as anomalias positivas e negativas da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nas bacias dos oceanos Atlântico e Pacífico (SANTOS; AQUINO, 2017).

Na Tabela 6 estão em destaque os meses que contam com as maiores e menores precipitações, sendo o mês de março o que conta com as maiores médias acumuladas de chuvas. Por outro lado, referente às menores médias acumuladas de chuva durante o mês, há uma maior variabilidade destas, distribuindo-se entres os meses de julho a outubro, mas com o mês de agosto contando com a maior ocorrência de menores médias acumuladas de chuva dentre as estações analisadas.

As evapotranspirações potenciais máximas e mínimas identificadas foram para as estações de Luzilândia e Alto Parnaíba, com valores de 1930,0 mm e 1586,8 mm, respectivamente (Tabela 6). Somente para as estações de São Luís e Turiaçú (extremo norte do Maranhão) a evapotranspiração potencial (ETP) anual não foi superior à precipitação anual acumulada. Isto se dá em função da alta demanda evaporativa da atmosfera em grande parte

da região Nordeste que conta com valores elevados de temperatura, especialmente nas regiões mais interiores (SANTOS, 2016).

Tabela 6 – Precipitação e evapotranspiração potencial média mensal e anual, no Estado do Maranhão.

Est.	Meses												Total anual
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
	Precipitação (mm)												
1.	229,8	203,8	243,0	125,9	41,8	2,7	0,5	2,3	17,9	73,1	149,4	172,0	1262,1
2.	254,1	311,9	379,9	356,6	190,0	50,6	20,2	10,3	13,4	28,8	63,9	133,1	1812,8
3.	221,8	187,9	180,4	121,8	49,3	4,6	2,5	1,3	18,6	86,9	154,7	172,2	1201,9
4.	169,4	192,6	223,0	157,9	71,2	14,1	10,4	6,7	13,9	35,7	80,6	111,7	1087,3
5.	278,9	281,2	282,8	199,1	88,5	12,3	7,9	8,4	37,3	115,2	177,1	230,4	1719,0
6.	201,5	249,6	327,6	284,7	149,9	30,4	18,0	10,2	12,4	28,3	40,7	100,2	1453,5
7.	231,5	274,1	377,5	338,5	200,2	68,7	26,8	5,4	3,0	17,1	43,4	86,2	1672,5
8.	193,4	198,5	240,1	166,0	81,8	15,0	7,1	7,9	24,1	62,4	105,2	134,6	1236,3
9.	250,3	243,1	288,5	194,7	90,7	14,4	6,5	6,2	27,7	65,4	129,7	181,8	1499,1
10.	228,7	315,8	452,4	419,8	309,1	177,0	115,2	24,6	4,3	3,7	10,7	57,3	2118,6
11.	220,2	303,7	449,4	424,3	309,4	218,4	155,8	49,6	11,6	10,8	13,0	38,4	2204,5
12.	252,1	323,5	348,6	336,8	198,5	85,4	45,4	17,3	18,2	24,6	53,5	103,1	1807,0
13.*	199,2	181,0	179,5	135,7	50,3	7,6	3,8	0,5	9,5	60,3	76,2	137,1	1040,7
14.*	188,7	191,9	270,9	259,5	135,8	68,8	31,8	11,5	6,0	14,1	21,8	60,5	1261,3
15.*	186,4	255,5	279,1	256,4	117,9	20,0	15,2	5,2	9,6	25,0	40,5	102,2	1313,2
	Evapotranspiração potencial (mm)												
1.	134,8	119,0	131,5	129,1	129,0	104,9	105,0	124,6	148,5	161,2	149,2	149,9	1586,8
2.	149,0	132,9	146,8	142,6	150,3	145,9	149,9	157,5	158,7	167,9	162,9	162,3	1826,6
3.	127,3	114,8	130,3	137,9	144,2	137,8	141,5	154,7	160,3	163,7	146,2	144,3	1702,9
4.	135,5	115,6	126,3	126,3	129,8	121,3	129,1	149,9	156,3	164,9	155,8	152,8	1663,6
5.	130,9	118,0	132,9	138,8	145,2	140,2	147,6	160,0	161,0	158,3	145,6	144,3	1722,8
6.	152,6	132,5	143,4	139,6	144,3	139,0	145,5	156,4	163,1	175,2	168,8	166,7	1827,0
7.	147,8	122,5	131,1	128,6	141,6	136,9	142,3	150,3	151,1	161,9	158,8	160,0	1733,0
8.	134,7	118,3	129,0	128,2	131,2	119,4	125,4	146,2	155,0	166,2	154,2	150,8	1658,7
9.	145,6	130,5	142,7	140,3	148,0	144,0	148,2	159,2	158,5	164,1	153,3	152,1	1786,7
10.	148,1	129,8	133,4	130,2	141,0	135,7	132,5	142,8	142,5	152,9	151,5	155,7	1695,9
11.	151,0	131,2	134,8	136,5	142,6	137,7	141,4	146,5	145,8	156,1	154,8	157,9	1736,4
12.	147,7	123,1	135,0	138,0	144,9	140,1	143,4	150,0	149,4	159,9	157,3	158,3	1747,0
13.*	151,6	132,6	144,4	142,2	148,3	144,7	153,9	165,1	170,0	181,3	168,2	161,2	1863,4
14.*	163,4	141,8	152,2	146,2	154,7	150,0	157,1	165,8	166,6	179,4	176,2	176,7	1930,0
15.*	152,0	130,4	133,3	136,6	142,8	137,3	142,9	152,3	159,2	172,9	167,3	164,9	1792,0

Est.: Estações; 1: Alto Parnaíba; 2: Bacabal; 3: Balsas: 4: Barra do Corda; 5: Carolina: 6: Caxias; 7: Chapadinha; 8: Colinas; 9: Imperatriz; 10: São Luís; 11: Turiaçu; 12: Zé Doca; 13: Floriano; 14: Luzilândia; 15: Teresina.
*Municípios localizados na divisa política entre os Estados do Maranhão e Piauí. **Fonte dos dados:** estações meteorológicas do INMET. **Elaboração:** os autores (2022).

Os dois maiores valores de ETP (1930,0 mm e 1863,4 mm) foram identificados para as estações de Luzilândia e Floriano (Tabela 6), instaladas basicamente na região de transição

entre os biomas Cerrado e Caatinga, situado este último em sua grande maioria no sertão nordestino, o qual conta com altas temperaturas ao longo do ano, com valores de ETP anual superiores à precipitação anual (REBOITA *et al.,* 2016), o tornando inviável para o crescimento de vegetação densa (AYOADE, 2007).

3.3. Balanço hídrico climatológico e classificação climática

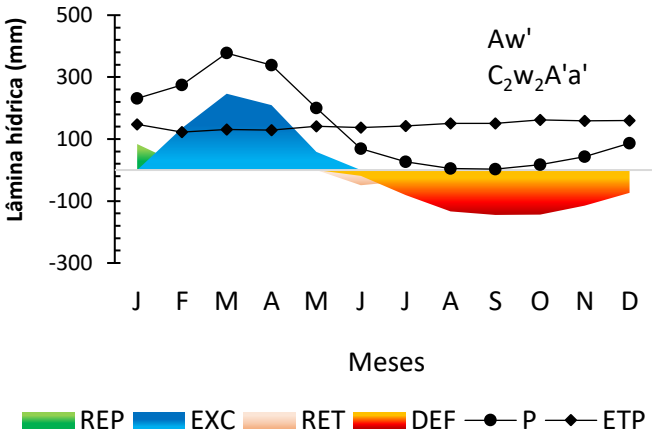
São apresentadas na Tabela 7 as variáveis do Balanço Hídrico Climatológico e representação gráfica completa com as classificações climáticas de Köppen e Thornthwaite (Figura 3) para a estação meteorológica convencional de Chapadinha, podendo ser considerada como representativa para as condições climáticas dos municípios de Afonso Cunha, Codó, Coelho Neto, Mata Roma, São Benedito do Rio Preto, Timbiras, Urbano Santos e Vargem Grande, uma vez que estes fazem divisa com o município de Chapadinha (COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA, 2021) e, considerando que os valores das variáveis do BHC são derivados de equações que contem em sua estrutura índices térmicos regionais. Para tal estação, observa-se deficiências hídricas anuais acumuladas de 710,8 mm, sendo distribuídas entre os meses de junho a dezembro; observa-se também excedente hídrico anual de 650,3 mm distribuídos entre fevereiro e maio.

Tabela 7 - Extrato das variáveis do balanço hídrico climatológico (em mm) segundo Thornthwaite; Mather (1955), para a estação meteorológica de Chapadinha, no período de 1996-2021.

Mês	P	ETP	P-ETP	ALT	ETR	DEF	EXC
Jan	231,6	147,8	83,7	83,7	147,8	0	0
Fev	274,1	122,5	151,7	16,3	122,5	0	135,4
Mar	377,5	131,1	246,4	0	131,1	0	246,4
Abr	338,51	128,6	209,9	0	128,6	0	209,9
Mai	200,2	141,6	58,6	0	141,6	0	58,6
Jun	68,7	136,9	-68,2	-49,3	118,1	18,9	0
Jul	26,8	142,3	-115,5	-34,8	61,6	80,7	0
Ago	5,4	150,3	-145,0	-12,2	17,5	132,8	0
Set	3,0	151,1	-148,1	-2,9	5,9	145,3	0
Out	17,1	161,9	-144,8	-0,7	17,8	144,2	0
Nov	43,4	158,8	-115,4	-0,1	43,6	115,3	0
Dez	86,2	160,0	-73,8	0	86,2	73,8	0
Anual	1672,5	1733,0	-60,5	0	1022,2	710,8	650,3

P: precipitação; ETP: evapotranspiração potencial; ALT: alteração do armazenamento de água no solo (+ indica recarga; - indica retirada); ETR: evapotranspiração real; DEF: deficiência hídrica; EXC: excesso hídrico. Considerando a CAD = 100 mm. **Fonte:** Elaborado pelos autores (2022).

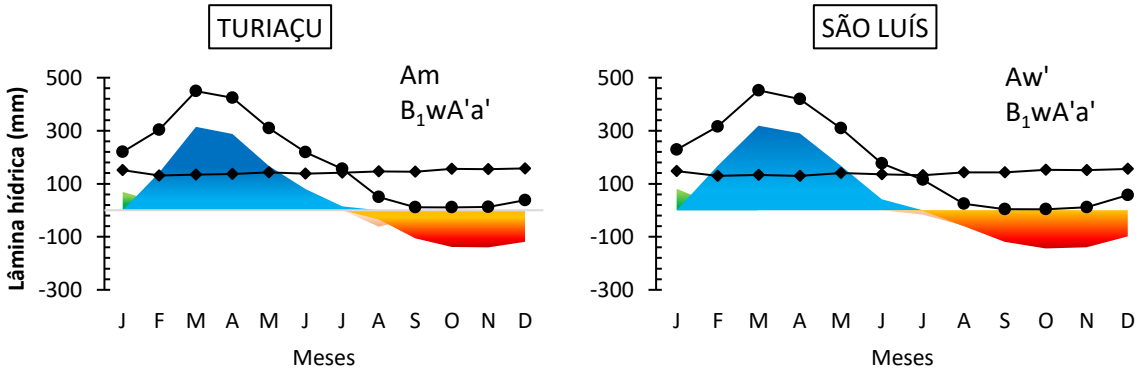
Figura 3 - Representação gráfica completa do BHC para a estação meteorológica convencional de Chapadinha, na região Leste do Estado do Maranhão.

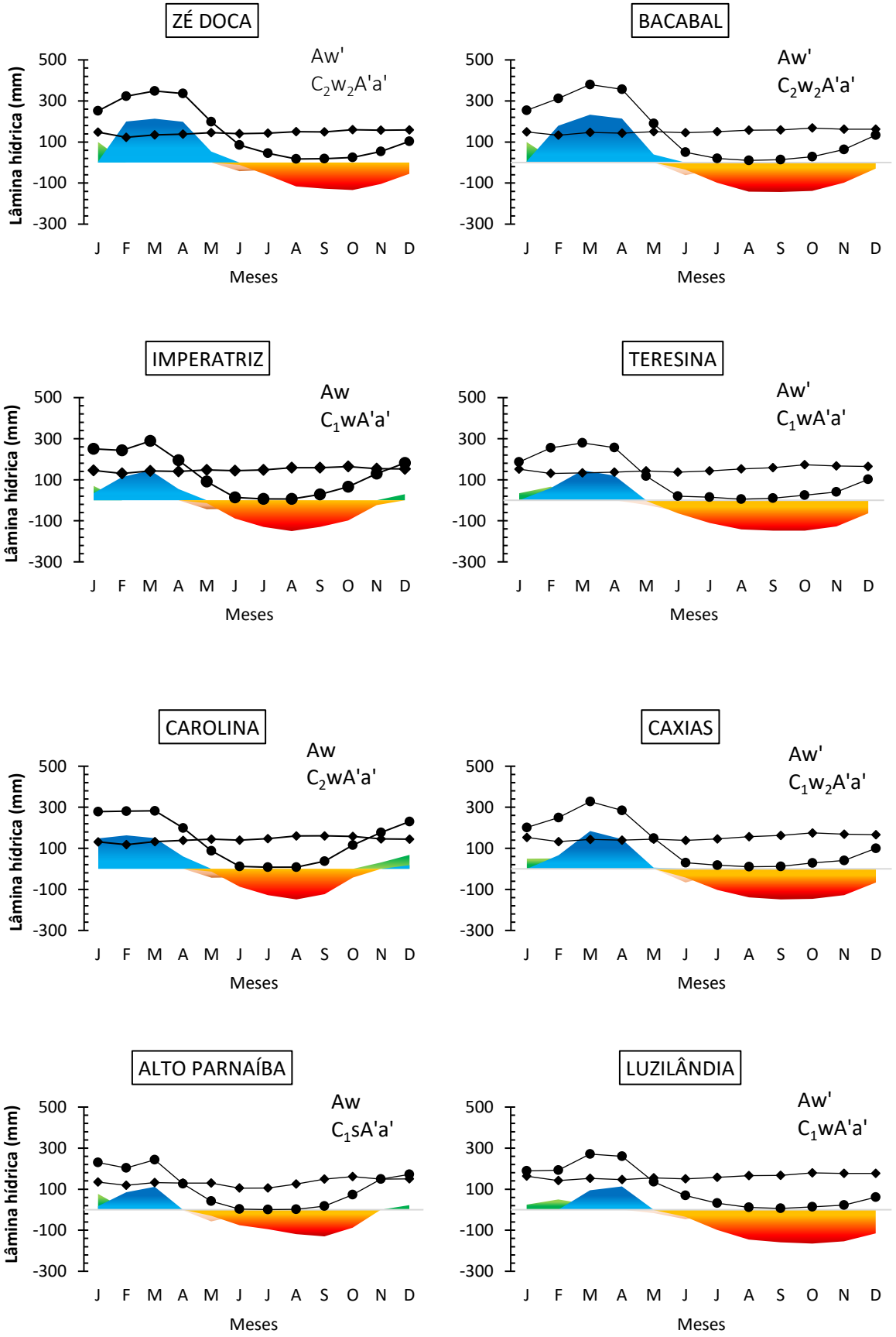


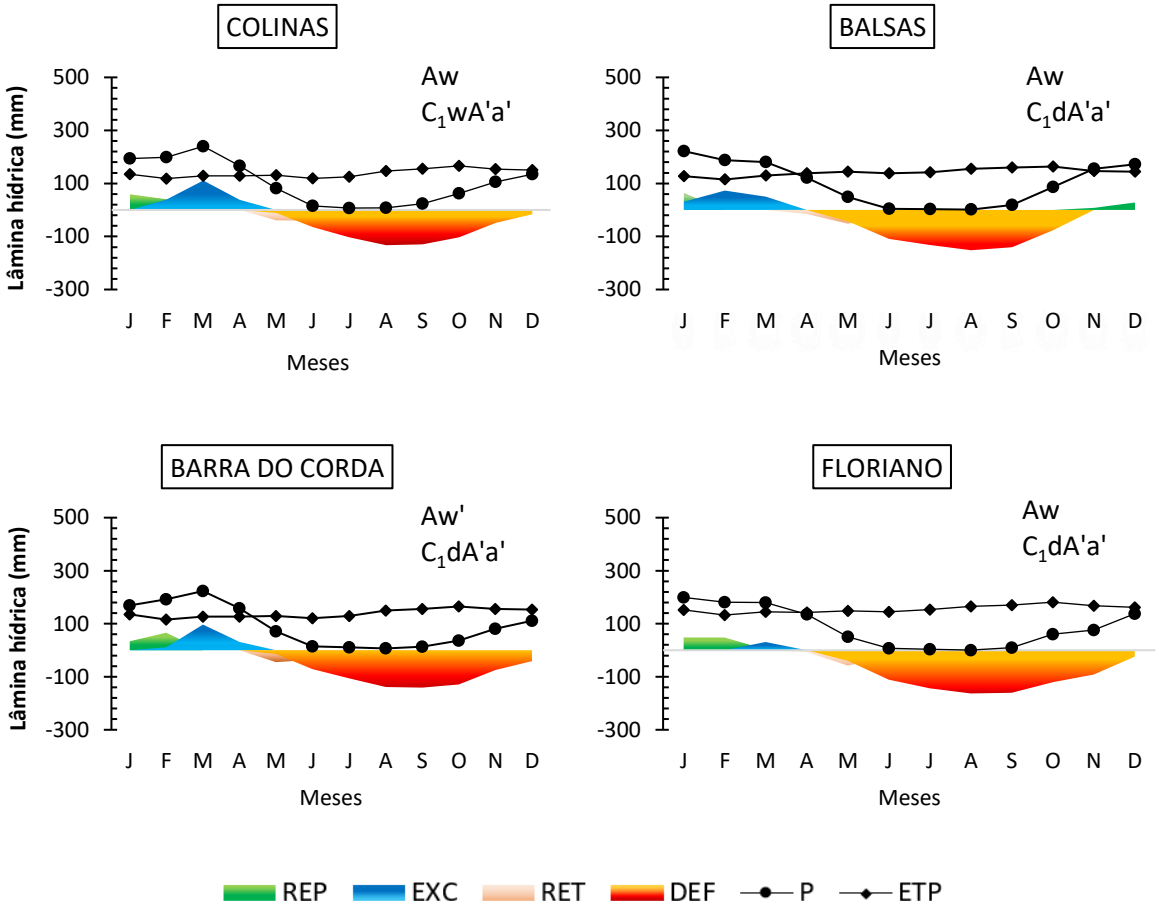
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Com os balanços hídrico climatológicos distribuídos nas regiões Norte, Leste, Central e Sul do Estado do Maranhão (conforme ilustrado na Figura 1), pode-se analisar as diferenças entre os períodos de excedente e deficiência hídrica relativas às quinze estações meteorológicas estudadas. Na Figura 4 constam os BHC's junto com as classificações climáticas de Köppen e Thornthwaite, sendo possível observar maiores excedentes hídricos para as estações de Turiaçú e São Luís, que ficam no extremo norte do Estado em regiões litorâneas, ao passo que para as demais estações os excedentes são menores, especialmente para as que estão instaladas mais ao Sul do Maranhão.

Figura 4 - Representação gráfica completa dos balanços hídricos climatológicos e classificações climáticas de Köppen e Thornthwaite para as estações meteorológicas convencionais avaliadas no estudo.



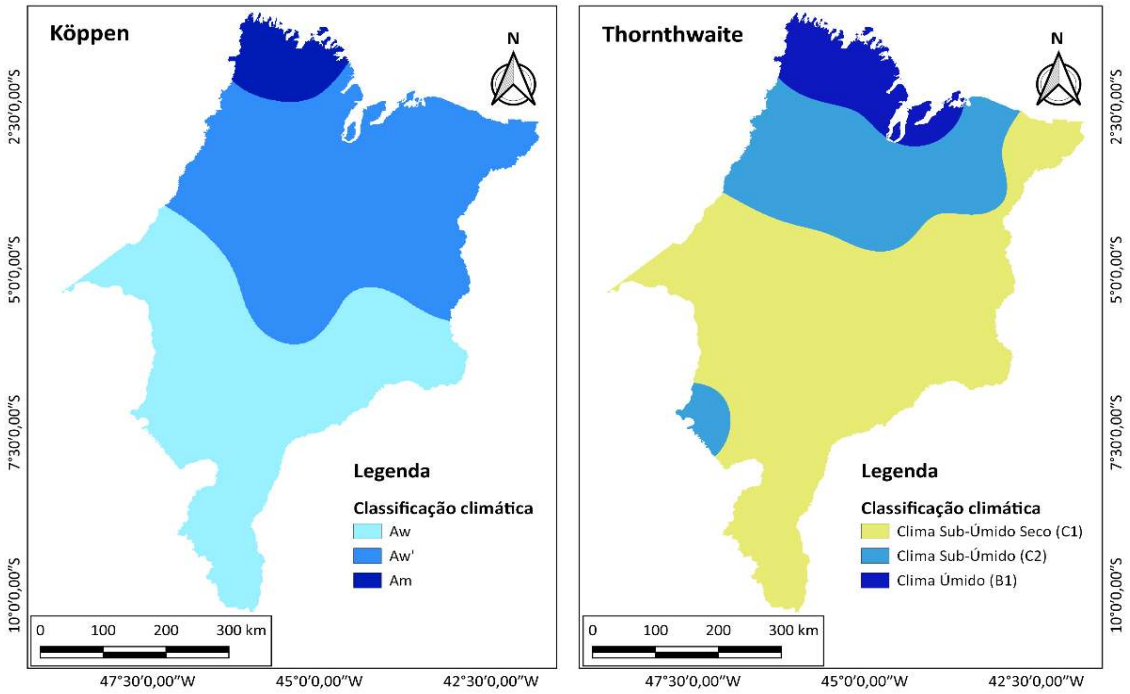

ZÉ DOCA
Aw'
$C_2w_2A'a'$
BACABAL
Aw'
$C_2w_2A'a'$
IMPERATRIZ
Aw
$C_1wA'a'$
TERESINA
Aw'
$C_1wA'a'$
CAROLINA
Aw
$C_2wA'a'$
CAXIAS
Aw'
$C_1w_2A'a'$
ALTO PARNAÍBA
Aw
$C_1sA'a'$
LUZILÂNDIA
Aw'
$C_1wA'a'$
Lâmina hídrica (mm)
500
300
100
-100
-300
J F M A M J J A S O N D
Meses



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Pelo sistema de classificação climática de Köppen (1931), foram determinados três tipos climáticos para o Maranhão, sendo estes Aw, Aw' e Am, especializados na Figura 5. Alvares *et al*. (2013), realizaram a classificação climática para o Brasil pela metodologia de Köppen (1936) e, no Estado do Maranhão, foram identificados três tipos climáticos, sendo estes Aw, Am e *As* (que não foi identificado no presente estudo). Porém, cabe destacar algumas peculiaridades a respeito da metodologia empregada no estudo de Alvares *et al.* (2013) que a diferencia em relação ao estudo atual: foram utilizadas uma maior quantidade de estações no estudo dos autores citados; o período dos dados utilizados foi entre 1950 e 1990, ao passo que o estudo atual englobou uma série histórica dentro do período de 1990 a 2021, no máximo; a definição de verão utilizada pelos autores foi com base nos seis meses mais quentes do hemisfério sul, que vai de outubro a março e, o inverno, sendo os seis meses mais frios do mesmo hemisfério, que vai de abril a setembro. Estes são fatores que podem acarretar em algumas diferenças nos resultados encontrados com base nas metodologias utilizadas.

Figura 5 - Mapas de classificação climática do Estado do Maranhão



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Pelo sistema de classificação climática de Thornthwaite (1948), foram determinados sete tipos climáticos, sendo estes: $C_1dA'a'$, $C_1sA'a'$, $C_1wA'a'$, $C_1w_2A'a'$, $C_2wA'a'$, $C_2w_2A'a'$ e $B_1wA'a'$, respectivamente. Os tipos climáticos subúmido seco (C_1), subúmido (C_2) e úmido (B_1) estão especializados na Figura 5. No ano de 2002, o NUGEO e o LABGEO da Universidade Estadual do Maranhão realizaram a classificação climática proposta por Thornthwaite (1948) para o Estado do Maranhão, disponível para download gratuito (https://www.bellalex.net/arquivos/studio-idro-geologico-climatico-ed-altro.pdf). Foram identificados quatro tipos climáticos, sendo: subúmido seco (C_1), subúmido (C_2), úmido (B_1) e úmido (B_2). No presente estudo, não foi identificado o tipo climático úmido (B_2), indicando que o índice de umidade vem diminuindo para o Estado do Maranhão.

Nove municípios dos quais constam no estudo atual também constavam no estudo do NUGEO/LABGEO. No entanto, destes nove municípios, no presente estudo, somente Balsas, Barra do Corda e Imperatriz tiveram seu clima determinado por meio de uma série histórica de dados superior a 30 anos e apresentaram mudança climática em relação à classificação feita pelo NUGEO/LABGEO. Os climas dos municípios citados eram: $C_1sA'a'$ para Balsas e Barra do Corda; para Imperatriz, $B_1wA'a'$. No estudo atual os climas identificados para Balsas e Barra

do Corda foram $C_1dA'a'$, e para Imperatriz, $C_1wA'a'$. Ambos os climas determinados neste estudo revelam uma diminuição dos excedentes hídricos e/ou umidade.

A queima de combustíveis fósseis e a agricultura são duas das principais atividades antrópicas pelas quais são liberados para a atmosfera grandes quantidades de gases causadores do efeito estufa, sendo o desmatamento da floresta amazônica a principal causa de emissões no Brasil (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA & UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2008; MAPBIOMAS, 2022; OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023). De acordo com o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Estado do Maranhão (PPCD-MA, 2011), na Amazônia Legal Maranhense o desmatamento está ligado a atividades ilícitas e/ou práticas não-sustentáveis proveniente de setores econômicos primários (pecuária, agricultura, extrativismo vegetal e mineração) e secundários (siderurgia, madeireiro, construção civil, etc.).

O trio dos principais gases de efeito estufa é formado pelo dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4). Apesar dos dois últimos existirem na atmosfera em proporções bem inferiores ao CO_2, ambos possuem um potencial de aquecimento muito maior, sendo o CH_4 21 vezes mais eficiente na retenção de calor e o N_2O 300 vezes em relação ao CO_2 (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA; UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2008). De Acordo com o Observatório do Clima (2023), no Maranhão, de 1990 a 2021: Mudanças de Uso da Terra e Florestas (que envolve práticas da agricultura, como derrubada e queima da floresta para produção de grãos, por exemplo) e o setor de energia foram os principais emissores de CO_2 para atmosfera; a agropecuária foi a principal responsável pela emissão de CH_4 por meio da fermentação entérica e das fezes do gado; e a emissão de N_2O causada principalmente pela agropecuária (derrubada e queima da floresta para abertura de novas áreas) e Mudanças de Uso da Terra e Florestas (uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura). Processos físicos como mudanças na composição atmosférica, nos aspectos continentais (orografia, vegetação, albedo, etc.), por exemplo, são os responsáveis tanto pelo clima como por suas mudanças ao longo do tempo (AYOADE, 2007).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Estado do Maranhão conta com duas estações climáticas bem definidas, uma chuvosa e uma seca. Os maiores volumes de precipitação ocorrem mais para a região Norte

do Estado, ao passo que para as demais regiões tais volumes diminuem. A estação chuvosa para o Norte do Estado se estende de janeiro a julho, aproximadamente, com estação seca de agosto a dezembro; para o Leste a estação chuvosa vai de janeiro a maio, com estação seca de junho a dezembro; para as demais regiões a estação chuvosa vai de janeiro a abril, com estação seca de maio a dezembro. As precipitações totais durante o ano apresentam variação aproximada de 1040 a 2210 mm paras as quinze estações avaliadas.

Com base na classificação climática de Köppen, as quinze estações meteorológicas avaliadas apresentam três tipos climáticos, sendo Aw, Aw' e Am. Por outro lado, pela classificação climática de Thornthwaite há uma maior variabilidade de tipos climáticos, sendo estes $C_1dA'a'$, $C_1sA'a'$, $C_1wA'a'$, $C_1w_2A'a'$, $C_2wA'a'$, $C_2w_2A'a'$ e $B_1wA'a'$, todos megatérmicos, apresentando concentrações da ETP de verão inferior à 48,0% em relação à ETP anual. A região Norte do Estado é mais úmida em relação às demais regiões.

Com base nas metodologias utilizadas foi possível atualizar a classificação climática do Estado do Maranhão com base na utilização de dados mais recentes (entre 1990 e 2021) de precipitação pluviométrica e temperatura média do ar. Sendo detectados tipos climáticos semelhantes e diferentes aos apresentados em estudos anteriores.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de prestar agradecimento ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e ao Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária (SISDAGRO) pela disponibilização dos dados para a elaboração do presente estudo.

REFERÊNCIAS

DE ALMEIDA, H. A.; HERMENEGIDIO, G. M. dos S. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estações meteorológicas convencional e automática. **Revista Brasileira de Climatologia**, [*S. l.*], v. 12, 2013. DOI: 10.5380/abclima.v12i1.30940.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [*S. l.*], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 12. ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2007. 332 p. Tradução: Maria Juraci Zani dos Santos. Título original: Introduction of climatology for the tropics.

BLAIN, G. C.; PICOLI, M. C. A.; LULU, J. Análises estatísticas das tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima do ar no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 3, p.807-815, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000300030.

BLAIN, G. C. Séries anuais de temperatura máxima média do ar no estado de São Paulo: variações e tendências climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 25, n. 1, p. 114-124, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000100010.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Atlas Climatológico do Brasil**: reedição de mapas selecionados. Rio de Janeiro, 1969. 100 p.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA. **Municípios no Estado do Maranhão na área de atuação da CODEVASF**. [*S. l.*], Ministério do desenvolvimento regional. 2021.

CUNHA, A. R. da; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **IRRIGA**, [*S. l.*], v. 14, n. 1, p. 1–11, 2009. DOI: 10.15809/irriga.2009v14n1p1-11.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000600039.

DINIZ, A. F.; SANTOS, R. L.; SANTO, S. M. Avaliação dos riscos de seca para o município de Feira de Santana-BA associado à influência do *El Niño* no semiárido do nordeste brasileiro. **+Geografia´s**, Feira de Santana, n. 1, p. 18-24, 2008. Disponível em: https://docplayer.com.br/7810370-Avaliacao-dos-riscos-de-seca-para-o-municipio-de-feira-de-santana-ba-associado-a-influencia-do-el-nino-no-semi-arido-do-nordeste-brasileiro.html. Acesso em: 25 ago. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.; UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo, 2008.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005. DOI: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215.

HORIKOSHI, A. S.; FISCH, G. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 32-46, 2007. DOI: 10.4136/ambi-agua.25.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma.html. Acesso em: 25 ago. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos**. 2022. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/#.

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**: Outline of climate Science. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388 p.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 488-498, 1980. DOI: 10.1175/1520-0493(1980)108<0488:DRVINB>2.0.CO;2.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001. Disponível em: https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/1136. Acesso em: 20 ago. 2022.

MAPBIOMAS. **Relatório anual do desmatamento no Brasil 2021**. São Paulo, Brasil. 2022. 126 p. Disponível em: http://alerta.mapbiomas.org. Acesso em: 21 mar. 2023.

MARANHÃO. **Atlas do Maranhão**. 2. ed. Gerência de Planejamento e Desenvolvimento Econômico, Laboratório de Geoprocessamento-UEMA. São Luís: GELPLAN, 2002. Disponível em: https://www.bellalex.net/arquivos/studio-idro-geologico-climatico-ed-altro.pdf. Acesso em: 17 set. 2022.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia:** noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais**... Rio de Janeiro. p. 1334-1342, 2000. CD-ROM.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, p. 1-10, 2002. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/327219140/Uma-revisao-da-dinamica-das-chuvas-no-Nordeste-brasileiro-pdf. Acesso em: 18 set. 2022.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **SEEG 10 anos**: análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2021. 2023. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 10 abr. 2023.

OLIVEIRA, A. D. de; ALMEIDA, B. M. de; CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; ESPINOLA SOBRINHO, J.; VIEIRA, R. Y. M. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Jaboticabal-SP. **Revista Caatinga**, [*S. l.*], v. 23, n. 4, p. 108-114, 2010. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/64262/1/S1524Alexsandra.pdf. Acesso em: 25 set. 2022.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia:** fundamentos e aplicações práticas. ed. rev. e ampl. Piracicaba, SP. 2007. 203 p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia:** fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. FEALQ. 1997. 183 p.

PEREIRA, L. M. P.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; CAVIGLIONE, J. H. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Londrina-PR.

Semina Ciências Agrárias, [*S. l.*], v. 29, n.2, p. 299-306, 2008. DOI: https://doi.org/10.5433/1679-0359.2008v29n2p299.

PLANO DE AÇÃO PARA PREVENÇÃO E CONTROLE DO DESMATAMENTO E DAS QUEIMADAS NO ESTADO DO MARANHÃO. Decreto n° 27.317, de 14 de abril de 2011. **Governo do Estado do Maranhão.** São Luís, Maranhão. nov. 2011. Disponível em: https://www.fundoamazonia.gov.br/export/sites/default/pt/.galleries/documentos/politicas-publicas-orientadoras/Plano_Estadual_Maranhao.pdf. Acesso em: 21 mar. 2023.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didatica**, Campinas, SP, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2012. DOI: https://doi.org/10.20396/td.v8i1.8637425.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; ARMANDO, R. P.; FREITAS, C.; MARTINS, D.; MILLER, G. Causas da semi-aridez do sertão nordestino. **Revista Brasileira de Climatologia**, [*S. l.*], v. 19, 2016. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v19i0.42091.

ROLIM, G. de S.; CAMARGO, M. B. P. de; MORAES, J. F. L. de. Classificação climática de Köppen e Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000400022.

SANTOS, D. F. dos. Entenda a disponibilidade hídrica e a evapotranspiração no Brasil. **agrosmart.** 2016. Disponível em: https://agrosmart.com.br/blog/disponibilidade-hidrica-evapotranspiracao/#:~:text=Entenda%20a%20disponibilidade%20h%C3%ADdrica%20e%20a%20evapotranspira%C3%A7%C3%A3o%20no%20Brasil&text=A%20disponibilidade%20h%C3%ADdrica%20adequada%20%C3%A9,dist%C3%BArbios%20fisiol%C3%B3gicos%20negativos%20na%20planta%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 22 de abr. 2023.

SANTOS, F. de A. dos; AQUINO, C. M. S. de. Análise da precipitação pluviométrica no município de Castelo do Piauí, Nordeste do Brasil. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, [*S. l.*], v. 21, n. 2, p. 619-633, 2017. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2017.123154.

SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T.; ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 3, p. 142-149, 2010. DOI: 10.7127/rbai.v4n300010.

SANTOS, R. B.; SOUZA, A. P. de; SILVA, A. C.; ALMEIDA, F. T. Planejamento da pulverização de fungicidas em função das variáveis meteorológicas na região de Sinop, MT. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.6, n.1, p.72-88, 2013. DOI: 10.14688/1984-3801.v06n01a07.

SILVA, L. É. P.; BRACHT, E. Uma nova abordagem para o cálculo de balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, [*S. l.*], v. 2, n. 1, p. 2-16, 2010. DOI: https://doi.org/10.5335/rbca.2013.722.

SOUZA, A. P. de; MOTA, L. L. da; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T. de; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado de Mato Grosso. **Nativa**, [*S. l.*], v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013. DOI: 10.31413/nativa.v1i1.1334.

SOUZA, I. de A.; GALVANI, E.; ASSUNÇÃO, H. F. de. Estudo comparativo entre elementos meteorológicos monitorados por estações convencional e automática na região de Maringá. **Acta Scientiarum Technology**, [*S. l.*], v. 25, n. 2, p. 203-207, 2003. DOI: 10.4025/actascitechnol.v25i2.2220.

STRASSBURGER, A. S.; MENEZES, A. J. E. A. de; PERLEBERG, T. D.; EICHOLZ, E. D.; MENDEZ, M. E. G.; SCHÖFFEL, E. R. Comparação da temperatura do ar obtida por estação meteorológica convencional e automática. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [*S. l.*], v. 26, n. 2, p. 273-278, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000200011.

STRECK, N. A.; GARIEL, L. F.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. G.; PAULA, G. M. de. Variabilidade interdecadal na série secular de temperatura do ar em Santa Maria, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 8, p. 781-790, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000800001.

TEIXEIRA, R. F. B. O fenômeno de brisa e a sua relação com a chuva sobre Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [*S. l.*], v. 23, n. 3, p. 282-291, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000300003.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geography Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance: publications in climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: Versão Digital, 2006.