

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

João Paulo Marques de Barros

Análise Climatológica de Diferentes Índices de Conforto Térmico em Alagoas

Maceió, AL
2022

João Paulo Marques de Barros

Análise Climatológica de Diferentes Índices de Conforto Térmico em Alagoas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências Atmosféricas - ICAT da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia, aprovado em 3 de março de 2022.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva

Maceió, AL
2022

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Maria Rejane Ferreira – CRB-4 – 1665

B277a

Barros, João Paulo Marques de .

Análise climatológica de diferentes índices de conforto térmico em Alagoas /
João Paulo Marques de Barros. – 2022.

44 f. : il.

Orientadora: Fabrício Daniel dos Santos Silva.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia) – Universidade
Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 35-44

1.Climatologia. 2. *Temperatura*. 3.Umidade. 4. Conforto térmico -Alagoas. I.
Título.

CDU: 551.58(813.5)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

Aos meus familiares e à minha noiva Eloísa, por todo o apoio, companheirismo e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho e pelo incentivo a nunca desistir.

A todos os professores que me ensinaram ao longo de toda a jornada da graduação, sobretudo o meu professor Fabrício Daniel dos Santos Silva, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade. Para terminar, agradeço a todas as pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

RESUMO

Este trabalho avaliou a distribuição espacial do conforto térmico humano utilizando quatro diferentes índices de conforto bioclimáticos, com dados observados de 1980 a 2016, em Alagoas. Séries temporais diárias de temperatura média e umidade relativa para cada município foram extraídos de uma análise gradeada de alta resolução disponibilizada para todo Brasil, baseada em observações de superfície. Foram calculados e espacializados os índices Heat Index (HI), Relative Strain Index (RSI), Temperature-Humidity Index (THI) e Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT). Cada um desses índices permite avaliar as condições de conforto da população em ambientes abertos sob diferentes óticas: associação a ondas de calor, problemas de saúde em pessoas com maior sensibilidade ao calor, desconforto populacional ou riscos associados a exposição principalmente de trabalhadores expostos diretamente as condições ambientais. Os resultados indicaram que a temperatura e umidade se distribuem de forma diferenciada durante as estações do ano, em um gradiente norte-sul para a temperatura e leste-oeste para a umidade. Os índices foram analisados a partir de suas médias climatológicas sazonais e anuais. O verão se destacou para todos os índices como a estação preferencial de riscos associados ao calor e o inverno como a estação em que predomina o conforto. A hipsometria de Alagoas se mostrou determinante para separar as áreas de maior atenção daquelas com menores riscos associados ao calor.

Palavras-chave: temperatura, umidade, altitude, índices biometeorológicos.

ABSTRACT

This work evaluated the spatial distribution of human thermal comfort using four different bioclimatic comfort indices, with data observed from 1980 to 2016, in Alagoas. Daily time series of mean temperature and relative humidity for each municipality were extracted from a high-resolution grid analysis available for all of Brazil, based on surface observations. The Heat Index (HI), Relative Strain Index (RSI), Temperature-Humidity Index (THI) and Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) were calculated and spatialized. Each of these indices makes it possible to assess the comfort conditions of the population in open environments from different perspectives: association with heat waves, health problems in people with greater sensitivity to heat, population discomfort or risks associated with exposure, mainly of workers directly exposed to the environmental conditions. The results indicated that temperature and humidity are distributed differently during the seasons, in a north-south gradient for temperature and east-west for humidity. The indices were analyzed from their seasonal and annual climatological averages. Summer stood out for all indices as the preferred season of risks associated with heat and winter as the season in which comfort predominates. The hypsometry of Alagoas proved to be decisive in separating the areas of greater attention from those with lower risks associated with heat.

Key word: average temperature, relative humidity, altitude, biometeorological indices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Centroides dos municípios em que foram extraídas séries temporais da análise gradeada (Fonte: XAVIER ET AL, 2016), nas diferentes mesorregiões de Alagoas.....	
.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2: Temperatura aparente (índice de calor: HI) em graus Celsius de acordo com a temperatura do ar e umidade relativa.....	
.....	260
Figura 3: Climatologia da temperatura média em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.....	
.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 4: Climatologia da umidade relativa em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.....	
.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 5: Climatologia anual da (a) temperatura média e (b) umidade relativa. Período: 1980-2016.....	
.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 6: Climatologia do HI em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.....	
.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 7: Climatologia do RSI em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.....	
.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 8: Climatologia do THI em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.....	
.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 9: Climatologia do WBGT em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.....	
.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 10: Climatologia do WBGT em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016. Fonte: https://dados.al.gov.br/	

.....**Erro! Indicador não definido.**
Figura 11: Climatologia anual do (a) HI, (b) RSI, (c) THI e (d) WBGT. Período: 1980-2016
.....**Erro! Indicador não definido.2**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas de temperaturas e riscos associados ao HI.....	21
Tabela 2: Faixas do Índice de Tensão Relativa (RSI) e riscos associados.....	261
Tabela 3: Faixas do Índice de Temperatura e Umidade (THI) e faixas de conforto.....	Erro! Indicador não definido.2
Tabela 4: Faixas do WBGT e fatores de risco relacionados a atividade metabólica.....	Erro! Indicador não definido.3

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ISO	International Organization for Standardization
WBGT	Wet Bulb Globe Temperature
ET	Effective Temperature
HSI	Heat Stress Index
ITS	Index of Thermal Stress
UTCI	Universal Thermal Climate Index
THI	Temperature–Humidity Index
RSI	Relative Strain Index
WBDT	Wet-Bulbe Dry Temperature
PHS	Predicted Heat Strain
CMIP3	Coupled Model Intercomparison Project phase 3
RCP	Representative Concentration Pathway
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWS	National Weather Service
T	Temperatura do ar
°C	graus Celsius
UR	Umidade Relativa

%	percentual
e	pressão de vapor d'água
ABM	Australian Bureau of Meteorology
hPa	hectoPascal
q	umidade específica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO.....	12
2.2 RELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO E ONDAS DE CALOR.....	144
2.3 ESTUDOS ESPECÍFICOS PARA O BRASIL.....	166
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	188
3.1 DADOS E ÁREA DE ESTUDO	188
3.2 HEAT INDEX (HI):.....	199
3.3 RELATIVE STRAIN INDEX (RSI)	211
3.4 TEMPERATURA-HUMIDITY INDEX (THI)	211
3.5 WET-BULB GLOBE TEMPERATURE (WBGT)	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	233
4.1 HEAT INDEX (HI).....	Erro! Indicador não definido. 6
4.2 RELATIVE STRAIN INDEX (RSI)	Erro! Indicador não definido. 7
4.3 TEMPERATURA-HUMIDITY INDEX (THI) ..	Erro! Indicador não definido. 8
4.4 WET-BULB GLOBE TEMPERATURE (WBGT)	Erro! Indicador não definido. 9
5 CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	355

1 INTRODUÇÃO

O conforto térmico deve ser analisado tal qual uma sensação típica do ser humano, podendo ser avaliado de forma subjetiva e que depende de fatores psicológicos, físicos e fisiológicos. Do ponto de vista psicológico, trata-se de uma sensação de bem estar com o meio ambiente ao seu redor, do ponto de vista fisiológico como resultado do (des)equilíbrio termodinâmico entre corpo e ambiente na ausência de suor como elemento de regulação, e com relação as sensações físicas, o conforto térmico está relacionado as percepções corporais, como muito quente, quente, morno, frio e muito frio (FANGER, 1970; SILVA et al., 2018; COSTA et al., 2021).

O estudo pioneiro de FANGER (1970) utilizava pessoas em experimentos conduzidos em câmaras climatizadas, e buscava responder quais os limites para zonas de conforto e desconforto por calor e frio ajustando diferentes combinações de variáveis como temperatura, umidade e velocidade do vento. Como é muito difícil que todas as pessoas em determinadas condições fiquem totalmente confortáveis, devido as várias distinções entre os seres humanos relacionados a sua estrutura corporal, tipos de vestimentas, etc.; a ciência evoluiu no sentido de elaborar índices de conforto que pudessem ser usados de forma abrangente, principalmente para condições ambientais comuns a todos. Dessa forma, foram desenvolvidos diversos índices de conforto térmico *outdoor*, ou para as condições vigentes em ambientes naturais abertos, sem levar em consideração necessariamente se o indivíduo está diretamente exposta a essa condição, ou se está exposto com roupa adequada ou não, ou seja, índices que possibilitassem inferir, de forma geral, as condições de conforto térmico humano.

Esses índices buscam fornecer respostas do tipo: há contentamento e/ou bem estar das pessoas de acordo com as condições térmicas? é recomendável suspender determinados tipos de atividades baseado no que determinado índice de conforto térmico indica? há risco potencial para a saúde, principalmente de indivíduos mais sensíveis as condições de desconforto, como crianças, idosos e

imunossuprimidos? Para auxiliar tais questionamentos, os índices de conforto térmico baseados em variáveis ambientais geralmente são mostrados sob diferentes faixas de classificação, que indicam as respectivas zonas de conforto e desconforto térmico, de forma genérica ou mais detalhada.

Condições de desconforto térmico estão intrinsicamente associadas a dinâmica e evolução de variáveis meteorológicas, que do ponto de vista climático respondem a diferentes modos de variabilidade, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS - DINIZ et al., 2018), entre outros, como os que desencadeiam as ondas de calor e frio (BRÖDE et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2019; DINIZ et al., 2020). As tendências do comportamento futuro de índices de conforto térmico, sob determinados cenários de mudanças climáticas, também tem sido cada vez mais estudadas (COSTA et al., 2021; GOBO et al., 2022).

Alguns dos estudos citados no parágrafo anterior (DINIZ et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019; COSTA et al., 2021), contemplam a região Nordeste, ou alguma área específica dessa região. Em relação a Alagoas, há escassez de trabalhos que analisem as condições de conforto térmico de forma detalhada, ou quando há, são baseados em informações das poucas estações meteorológicas que estão em operação no Estado. Devido a importância desse tema para todo o mundo, e da escassez de estudos específicos para Alagoas, o objetivo dessa pesquisa de conclusão de curso foi realizar uma análise climatológica de quatro diferentes índices de conforto térmico, largamente utilizados na literatura científica, e verificar suas características espaciais de acordo com a sazonalidade para esse Estado brasileiro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO

O estresse térmico é mais evidenciado em áreas com temperaturas naturalmente elevadas, assim como em regiões cuja sazonalidade é bem marcada com verões quentes. Como cada indivíduo responde ao calor varia muito

(PRADHAN et al., 2013). Em longo prazo, a exposição ao estresse térmico leva o organismo a perder a habilidade de manter seu equilíbrio interno constante, capacidade conhecida por homeostase, levando a distúrbios como fadiga, câibras, insolação, danos aos principais órgãos do corpo, diminuição da produtividade, diminuição do desempenho físico e mental, além de aumento no número de acidentes em locais de trabalho (GOLBABAELI et al., 2015; ZAMANIAN et al., 2017; ZARE et al., 2018a).

Quando a exposição às condições ambientais ultrapassa a capacidade humana de manter a temperatura interna em homeostase, há o aumento da temperatura corporal, causa de grande parte das morbidades/mortalidades associadas ao calor, que levam a uma sobrecarga do sistema cardiovascular, com danos fisiológicos e colapso de funções vitais, especialmente em grupos vulneráveis, como crianças, idosos, gestantes e demais pessoas com outras morbidades (HAVENITH e FIALA, 2015; COFFEL et al., 2018).

A sensação de conforto térmico é causada pelo equilíbrio entre parâmetros ambientais, como temperatura, pressão de vapor d'água, velocidade do ar e temperatura média radiante, e o calor metabólico do corpo humano, que também depende de fatores complexos como atividade física e vestimentas (ZARE et al., 2018b). Essa interação entre ambiente natural e fisiologia dependente, torna o cálculo de índices de conforto complexo, necessitando de determinadas padronizações (SHEFFIELD et al., 2013). KAYWHITE et al. (1991), definiram que as condições ambientais ideais estariam condicionadas a temperaturas do bulbo seco entre os limites de 21 a 24°C, e umidade em torno de 50%.

Nas últimas décadas, um grande número de índices para cálculo do conforto térmico foram desenvolvidos para avaliar o calor em diferentes ambientes (MOHAN et al., 2014; HAVENITH e FIALA 2015), muitos deles aprovados pela International Organization for Standardization (ISO). Há nesse conceito de índices de conforto dois grandes grupos: o primeiro de índices experimentais, desenvolvidos a partir de estudos em laboratórios considerando parâmetros ambientais; e o grupo de índices racionais, derivados de cálculos e equações térmicas. Como exemplos da primeira categoria podemos citar os índices de temperatura global do bulbo úmido (WBGT

de sua sigla em inglês para Wet Bulb Globe Temperature), e o de temperatura efetiva (ET para sua sigla em inglês de Effective Temperature). Para o segundo grupo pode-se citar os índices de estresse por calor (HSI de sua sigla em inglês para Heat Stress Index) e o índice de estresse térmico (ITS de sua sigla em inglês para Index of Thermal Stress).

Um dos índices mais utilizados na atualidade, e aceito como referência, é o índice térmico climático universal (UTCI, de sua sigla em inglês para Universal Thermal Climate Index). Esse índice é indicado para avaliar o estresse térmico em espaços abertos ao ar livre, e sua aplicação visa promover informações para tomadas de decisões na saúde pública. É um índice racional sensível às variações da temperatura, temperatura média radiante, umidade e velocidade do vento (BLAZEJCZYK et al., 2012; KAMPMANN et al., 2012). BROEDE et al. (2013) apontam que o UTCI deve ser utilizado no desenvolvimento e planejamento urbano, assim como para estudar o efeito das condições climáticas no estresse térmico humano.

2.2 RELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO E ONDAS DE CALOR

Muitos estudos relacionam índices de conforto às ondas de calor, por serem representativos das condições atípicas que o corpo humano pode sofrer a partir de determinadas condições ambientais. Nesse tópico serão mostrados resultados de estudos em diferentes países, a fim de demonstrar a relevância e o interesse mundial por esse tema.

EMMANUEL (2005) estudou tendências históricas de dois índices de conforto no Sri Lanka, o índice de temperatura-umidade (THI de sua sigla em inglês para Temperature–Humidity Index), e o índice de tensão relativa (RSI de sua sigla em inglês para Relative Strain Index). Eles ainda correlacionaram as tendências com a taxa de modificação na cobertura do solo usando fotografias aéreas no período entre 1956 a 1999. Os autores verificaram que os índices de conforto se mantiveram relativamente estáveis, sem tendência significativa até 1977, crescentes a partir de 1978 com o rápido processo de urbanização em suas

principais cidades.

Também conhecidos como índices bioclimáticos, BANC et al. (2020) analisaram tendências de cinco índices de conforto em dez estações meteorológicas da Romênia entre 1961-2016. Os índices foram os de temperatura equivalente e efetiva, o índice de potência de resfriamento (*cooling power*), o UTCI e o THI. O teste de Mann-Kendall empregado mostrou que três índices mostraram predominância da classe confortável, enquanto outros dois indicaram condições de estresse por frio como dominantes, com uma mudança das condições de desconforto por frio para calor para os anos mais recentes, com o clima tornando-se mais ameno nas grandes cidades da Romênia durante o inverno e mais quentes no verão, com uma maior frequência das classes confortável e de estresse por calor nos últimos anos das séries analisadas.

Regiões áridas e semiáridas tem propensão natural a uma maior frequência das classes de desconforto e estresse pelo calor. Nessa direção, ZARE et al. (2019), avaliaram a correlação entre quatro índices de estresse térmico e parâmetros fisiológicos de trabalhadores em minas. Os índices utilizados foram o UTCI, WBGT, o de temperatura de ressecamento do bulbo úmido (WBDT de sua sigla em inglês para Wet Bulbe Dry Temperature), e o índice de verões tropicais (TSI de sua sigla em inglês para Tropical Summer Index), associados a parâmetros fisiológicos desses trabalhadores. Entre às 10 e às 14 horas de todos os dias entre julho a agosto de 2017, esses parâmetros foram medidos e avaliados. Os resultados mostraram correlações estatisticamente significativas entre o WBGT e TSI e a temperatura da pele, com o UTCI apontando para exposição ao estresse térmico severo dos trabalhadores.

A climatologia de dias e períodos extremamente quentes para a Bulgária foi obtida através de dados diários de temperaturas máximas de 115 estações meteorológicas no período 1961-2019. Indicadores climáticos mostraram que desde meados da década de 1980, casos de ondas de calor aumentaram acentuadamente, em mais de 90% das estações analisadas, com taxa média de aumento de 3,5 dias/10 anos sob forte estresse pelo calor (MALCHEVA et al., 2021).

Devido ao aumento no número de casos de insolação de trabalhadores em

fábricas de Bangladesh nos últimos anos, CHOWDHURY et al. (2017) avaliaram as condições de conforto desses locais por meio dos índices WBGT e tensão de calor prevista (PHS para sua sigla em inglês de Predicted Heat Strain). Verificaram que esses índices atingiram níveis muito acima do considerado confortável entre maio e agosto (quase a totalidade do verão no hemisfério norte), até 60% superiores aos obtidos com valores meteorológicos médios.

HEIDARI et al. (2015), ao analisarem a consistência entre a taxa de suor e o índice WBGT para avaliação do conforto térmico de trabalhadores ao ar livre em regiões áridas e semiáridas do Irã, concluíram que durante eventos de ondas de calor, o estresse pelo calor é uma condição física prejudicial para atividades praticadas ao ar livre, principalmente por trabalhadores, e que o monitoramento da taxa de suor é um dos melhores índices para avaliar a tensão pelo calor, pois o WBGT subestima o estresse por calor em trabalhadores expostos ao ambiente natural.

2.3 ESTUDOS ESPECÍFICOS PARA O BRASIL

Geralmente correlacionadas com extremos de temperatura, ondas de calor e frio tem sido estudados sob diferentes óticas no Brasil. REGOTO et al. (2021) analisaram índices de extremos de precipitação e temperatura no Brasil de 1961 a 2018, e encontraram sinais consistentes e generalizados de aquecimento, com o aumento dos extremos quentes mais concentrados na primavera e verão, e diminuição dos extremos frios principalmente no inverno. O sinal mais claro quanto a precipitação foi a tendência significativa para dias mais secos na região Nordeste e de clima mais úmido na região Sul. Particularmente para a região Nordeste, a combinação de dias mais secos e quentes também foi observada por COSTA et al. (2020a). COSTA et al. (2020b), utilizou a técnica de *downscaling* estatístico para regionalizar cenários futuros de mudanças climáticas do CMIP3 (*Coupled Model Intercomparison Project phase 3*) para o Nordeste do Brasil. Seus resultados apontaram redução das chuvas no horizonte 2021-2080, nos dois cenários que foram analisados: A1B e A2, ao passo que as temperaturas, de modo geral,

mostraram projeções de aquecimento futuro, com exceção para a temperatura máxima do norte do Nordeste. Esses resultados foram utilizados pelos mesmos autores (COSTA et al., 2021) para verificar quais os impactos desses cenários nas projeções futuras do índice de conforto térmico proposto por ONO e KAWAMURA (1991), o IDK, que leva em consideração a temperatura do ambiente e a umidade específica por meio da temperatura do ponto de orvalho em sua equação. Levar em consideração o efeito do vapor d'água é importante, por tratar-se de um dos mais eficientes gases de efeito estufa no que tange a sua capacidade de absorver o calor presente na atmosfera e o redistribuir no planeta (MAURELLIS e TENNYSON, 2003; JUNGES et al., 2018). Os principais resultados desse estudo mostraram que, caso confirmadas as projeções, haverá diminuição nos percentuais de dias classificados como confortáveis em detrimento do aumento de dias classificados como desconfortáveis pelo calor nas três áreas homogêneas que foram consideradas no Nordeste: o norte, a faixa leste e a porção centro-oeste, em relação ao período 1961-1990.

BITENCOURT et al. (2020) realizaram uma avaliação das condições de estresse pelo calor no Brasil de 1961 a 2010, além de projeções do índice WBGT até o final do século XXI. Perceberam que houve um aumento na frequência de dias associados a fatores de risco relacionados ao metabolismo, prejudiciais principalmente a trabalhadores agrícolas e da construção civil expostos a condições climáticas extremas, e que essa tendência aumenta para o futuro de acordo com as projeções futuras do clima. Ressaltam que medidas urgentes devem ser tomadas no âmbito de políticas públicas a fim de mitigar os riscos em especial aos trabalhadores diretamente expostos ao clima.

Especificamente para São Paulo, DINIZ et al. (2020) analisaram o efeito das ondas de calor na saúde das populações mais sensíveis e partir de diferentes limiares de temperaturas máximas diárias. Quantificaram a taxa de mortalidade em idosos entre 1985 e 2005, e avaliaram projeções futuras levando em consideração políticas públicas de adaptação as mudanças climáticas e um cenário sem adaptação, concluindo que a taxa de mortalidade associada às ondas de calor e desconforto térmico deve ser incrementada principalmente na população feminina

em uma situação de não adaptação. GOBO et al. (2022), em um estudo amplo para todo o estado de São Paulo, avaliaram de forma espacial o comportamento de índices de desconforto para os cenários de mudanças climáticas RCP 2.6 e 8.5, e obtiveram como resultados um aumento generalizado do desconforto térmico para todos os índices e cenários, com regiões desconfortáveis por frio tornando-se desconfortáveis pelo calor, principalmente no cenário RCP 8.5.

Estudos similares ao do parágrafo anterior foram conduzidos para a região semiárida do Brasil, mais precisamente na bacia do Rio São Francisco, com o índice WBGT para projeções dos cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5 entre 2021-2080 (OLIVEIRA et al., 2019). Nesse estudo, quando os valores do WBGT obtidos para 2071-2099 foram confrontados aos valores do período de referência 1961-2005, quase todos os municípios da bacia atingiram valores que indicam alto risco de estresse térmico, com consequências na capacidade de trabalho e na prática de exercícios físicos ao ar livre.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 DADOS E ÁREA DE ESTUDO

Foram utilizados dados diários da análise gradeada disponibilizada por XAVIER et al. (2016) no período 1980-2016 (37 anos), para o cálculo de quatro índices de conforto térmico. Essa análise gradeada, com resolução espacial de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ fornece dados de superfície das variáveis temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar, precipitação, velocidade do vento e evapotranspiração. Foram extraídas séries temporais para cada município de Alagoas utilizando o método de interpolação bilinear simples (LIU ET AL, 2015). Esse método calcula um valor da variável em um ponto específico da grade, o centroide do município (Figura 1), atribuindo pesos característicos a cada um dos quatro pontos da grade em relação à coordenada geográfica do ponto do centroide de interesse, com um peso maior quanto mais próximo do centroide estiver o respectivo ponto da grade (DA ROCHA JÚNIOR ET AL, 2019).

Os dados foram analisados nas escalas de tempo sazonal e anual, relativas

a média climatológica dos 37 anos de dados. Para os índices HI, RSI, THI e WBGT, as principais variáveis extraídas dos dados gradeados para cada município de Alagoas foram as temperaturas máximas e mínimas, a fim de compor as temperaturas médias diárias, e a umidade relativa, que permitiu o cálculo da pressão de vapor.

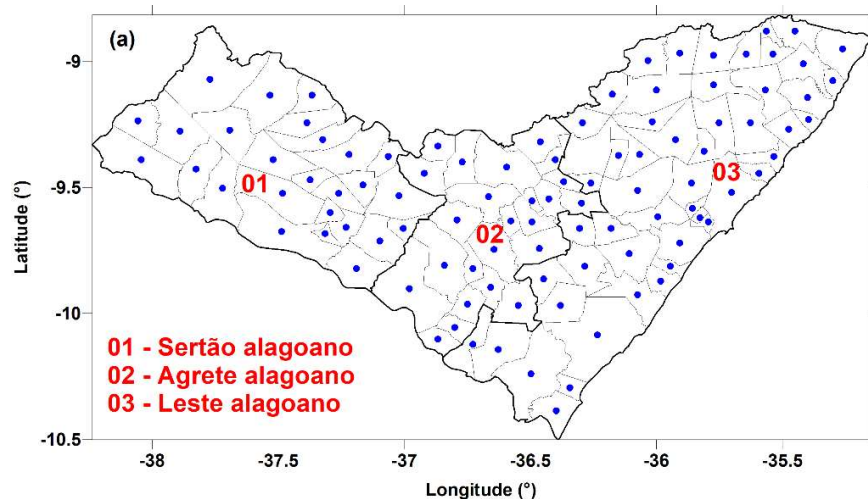


Figura 1: Centroides dos municípios em que foram extraídas séries temporais da análise gradeada de Xavier et al. (2016), nas diferentes mesorregiões de Alagoas.

3.2 HEAT INDEX (HI)

O HI foi desenvolvido por meio da análise de regressão múltipla das equações de Steadman (STEADMAN 1979a; STEADMAN 1979b; STEADMAN 1984) para radiação e exposição ao vento, como forma de utilizar apenas duas variáveis independentes convencionais: a temperatura ambiente e a umidade relativa. Outros parâmetros como radiação solar, vento, vestuário, fisiologia humana e carga de trabalho são assumidas implicitamente nesse índice desenvolvido pelo NOAA's National Weather Service (NWS) (ROTHFUSZ, 1990). Esse é um índice que tem como vantagens sua simplicidade e facilidade de implementação para monitoramento das condições de exposição ao calor em locais de trabalho, como ao ar livre.

A fórmula generalizada do HI para temperaturas ambiente acima de 26°C e umidade relativa acima de 40% é dada pela equação 1 (em °C):

$$HI = \frac{5}{9} [(C1 + C2T + C3UR + C4TUR + C5T^2 + C6UR^2 + C7T^2UR + C8TUR^2 + C9T^2UR^2) - 32] \quad (1)$$

onde: $C1 = -42,379$; $C2 = 2,04901523$; $C3 = 10,14333127$; $C4 = -0,22475541$;
 $C5 = -6,83783 \times 10^{-3}$; $C6 = -5,481717 \times 10^{-2}$; $C7 = 1,22874 \times 10^{-3}$; $C8 = 8,5282 \times 10^{-4}$; $C9 = -1,99 \times 10^{-6}$

Conforme descrito acima, o HI é o equivalente de temperatura percebido pelos humanos como resultado da temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Esta temperatura pode ter efeitos médicos potencialmente graves, que são mostrados de forma resumida na Figura 2. Sob condições de alta temperatura e umidade do ar (alto índice de calor-HI), a transpiração é dificultada devido à evaporação reduzida como resultado da alta umidade. O suor é a resposta fisiológica do corpo humano a altas temperaturas e é uma tentativa de diminuir a temperatura corporal através da evaporação do suor. Quando isso é impedido, pode ocorrer superaquecimento e desidratação, com gravidade variável. Abaixo está uma tabela, indicando possíveis complicações em níveis variados de valores do HI, de forma mais detalhada do que na Figura 2.

Umidade Relativa (%)	Temperatura do Ar (°C)										
	21	24	27	29	32	35	38	41	43	46	49
0	18	21	23	26	28	31	33	35	37	39	42
10	18	21	24	27	29	32	35	38	41	44	47
20	19	22	25	28	31	34	37	41	44	49	54
30	19	23	26	29	32	36	40	45	51	57	64
40	20	23	26	30	34	38	43	51	58	66	
50	21	24	27	31	36	42	49	57	66		
60	21	24	28	32	38	46	56	65			
70	21	25	29	34	41	51	62				
80	22	26	30	36	45	58					
90	22	26	31	39	50						
100	22	27	33	42							

	Risco grave para a saúde - insolação iminente
	Exposição e atividade prolongadas podem levar a insolação
	A exposição prolongada e a atividade podem levar à fadiga

Figura 2: Temperatura aparente (índice de calor: HI) em graus Celsius de acordo com a temperatura do ar e umidade relativa.

Tabela 1: Faixas de temperaturas e riscos associados ao HI.

° Celsius	Observações
18-26°C	Conforto climático
27-32°C	Cuidado: possibilidade de fadiga
32-41°C	Cuidado extremo: hipertermia
41-54°C	Perigo: hipertermia
Acima de 54°C	Perigo extremo: hipertermia (a insolação é iminente)

3.3 RELATIVE STRAIN INDEX

O índice RSI é usado para avaliar o estresse térmico de ambientes externos. É obtido a partir das variáveis temperatura do ar (T , em °C) e pressão de vapor d'água (e , em hPa) (equação 2). Devido ao fato de que em algumas estações não há acesso à variável pressão de vapor d'água, este parâmetro é determinado utilizando as duas variáveis de temperatura do ar (bulbo seco e úmido), e a umidade relativa conforme a Equação 3 (IONAC e CIULACHE, 2007; KYLE, 1992).

$$RSI = \frac{(T - 21)}{(58 - e)} \quad (2); \quad e = \frac{UR}{100} \times 6,112 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T}{237,7 + T}\right)} \quad (3)$$

onde T = temperatura do ar (°C); e é a pressão de vapor (hPa) e UR é a umidade relativa (%).

A Tabela 2 mostra a classificação do índice RSI em cinco níveis.

Tabela 2: Faixas do Índice de Tensão Relativa (RSI) e riscos associados.

Quantidade de RSI	Interpretação do índice
RSI < 0.15	Conforto climático
0.15 ≤ RSI < 0.25	Desconforto para indivíduos sensíveis, como idosos e crianças
0.25 ≤ RSI < 0.35	Desconforto para todas as pessoas
0.35 ≤ RSI < 0.45	Risco de insolação para 50% das pessoas e mais
RSI ≥ 0.45	Risco de hipertermia para todas as pessoas

3.4 TEMPERATURE-HUMIDITY INDEX (THI)

O THI, também conhecido como "índice de desconforto de Thom" (THOM, 1959), é uma variação do índice de temperatura efetiva. Combina as temperaturas de bulbo úmido e seco em uma escala que imita a sensação térmica de um ser

humano. Embora o índice original combinasse as temperaturas de bulbo úmido e seco, NIEUWOLT (1977) modificou o índice usando a temperatura do ar e a umidade relativa. Em situações em que os dados de umidade relativa estejam disponíveis com mais frequência do que a temperatura de bulbo úmido, o THI pode ser calculado de acordo com a equação 4.

$$THI = 0,8T + \frac{UR \times T}{500} \quad (4)$$

onde T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e UR é a umidade relativa (%). Ao testar empiricamente os valores de THI em seres humanos, os limites de conforto são definidos de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Faixas do Índice de Temperatura e Umidade (THI) e faixas de conforto.

THI	Observações
$21 \leq \text{THI} \leq 24$	100% das pessoas sentem-se confortáveis
$24 < \text{THI} \leq 26$	50% das pessoas sentem-se confortáveis
$\text{THI} > 26$	100% das pessoas sentem desconforto pelo calor

3.5 WET-BULB GLOBE TEMPERATURE (WBGT)

O WBGT é uma medida do estresse térmico sob luz solar direta, baseado na temperatura, umidade, velocidade do vento, ângulo solar e cobertura de nuvens. A equação (5) é usada para calcular o WBGT relativo a exposição humana em ambientes externos.

$$WBGT = 0,7T_W + 0,1T_A + 0,2T_G \quad (5)$$

T_W representa a temperatura natural do bulbo úmido, T_G é a temperatura do globo negro e T_A é a temperatura do ar (YAGLOU e MINARD 1957). T_W e T_G foram estimados usando dados de temperatura máxima, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação, aplicando o método desenvolvido por LILJEGREN et al. (2008) e recomendado por LEMKE e KJELLSTROM (2012). Este modelo tem sido estudado em diversos estudos em diferentes condições climáticas (KAKAMU et al., 2017; LEROYER et al., 2018; FARHANG DEGHAN et al., 2015; HAJIZADEH et al., 2016), além de ser recomendada pelo *Australian Bureau of Meteorology* (ABM), e simplifica a equação 5, resultando na equação 6 que foi aplicada nesse

trabalho.

$$WBGT = 0,567T + 3,94 + 0,393e \quad (6)$$

onde T = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); e é a pressão de vapor (hPa) obtida da equação

3. Os fatores de risco associados a cada faixa de WBGT é definido na Tabela 4.

Tabela 4: Faixas do WBGT e fatores de risco relacionados a atividade metabólica.

WBGT ($^{\circ}\text{C}$)	Fator de risco (Atividade metabólica humana)
≤ 26	Baixo (Atividade alta)
26.7 - 29.3	Moderado (Atividade moderada a alta)
29.4 - 31.0	Moderado próximo à risco (Atividade moderada)
31.1 - 32.1	Risco (Atividade leve)
≥ 32.2	Alto risco (Atividade muito leve)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices de conforto térmico são naturalmente dependentes das variáveis meteorológicas, e das diferentes combinações entre estas (DEOSTHALI 1999; GOBO et al., 2022). A temperatura é a mais importante dessas, presente em todos os índices de conforto, e a umidade como grandeza que representa o vapor d'água, em sua unidade específica (q em g/kg), relativa (UR em %) ou de sua pressão exercida em uma parcela de ar atmosférico (e em hPa). O papel da umidade é potencializar os efeitos da temperatura nas condições de conforto, diminuindo ou aumentando as sensações de conforto/desconforto. Temperatura alta/baixa com umidade alta/baixa tem diferentes implicações nas classes de conforto de qualquer índice, não obstante, essas variáveis estão presentes no cálculo dos quatro índices que foram alvo desse trabalho.

Assim, inicia-se essa seção apresentando-se as climatologias sazonal e anual da temperatura média e umidade relativa em Alagoas, no período 1980-2016.

O ciclo sazonal das temperaturas médias mostra maiores temperaturas no verão (Figura 3a), com variação de $25,4^{\circ}\text{C}$ a 29°C , e uma média estadual de $27,2^{\circ}\text{C}$, com o setor de temperaturas mais amenas localizado na zona da mata alagoana, e o de temperaturas mais elevadas em toda a porção estadual que faz divisa com o estado de Sergipe pelo Rio São Francisco. As temperaturas mais amenas são

observadas no inverno (Figura 3c), desde parte do sertão alagoano e agreste, com destaque para os municípios limítrofes a microrregião de Palmeira dos Índios, um setor com municípios de altitudes elevadas, como Mar Vermelho, com pouco mais de 700m de altitude e temperaturas médias no inverno em torno dos 22°C. As temperaturas médias no outono (Figura 3b) e primavera (Figura 3d) são similares, porém com o outono levemente mais quente, como pode-se notar da faixa aquecida mais ampla que limita o rio São Francisco.

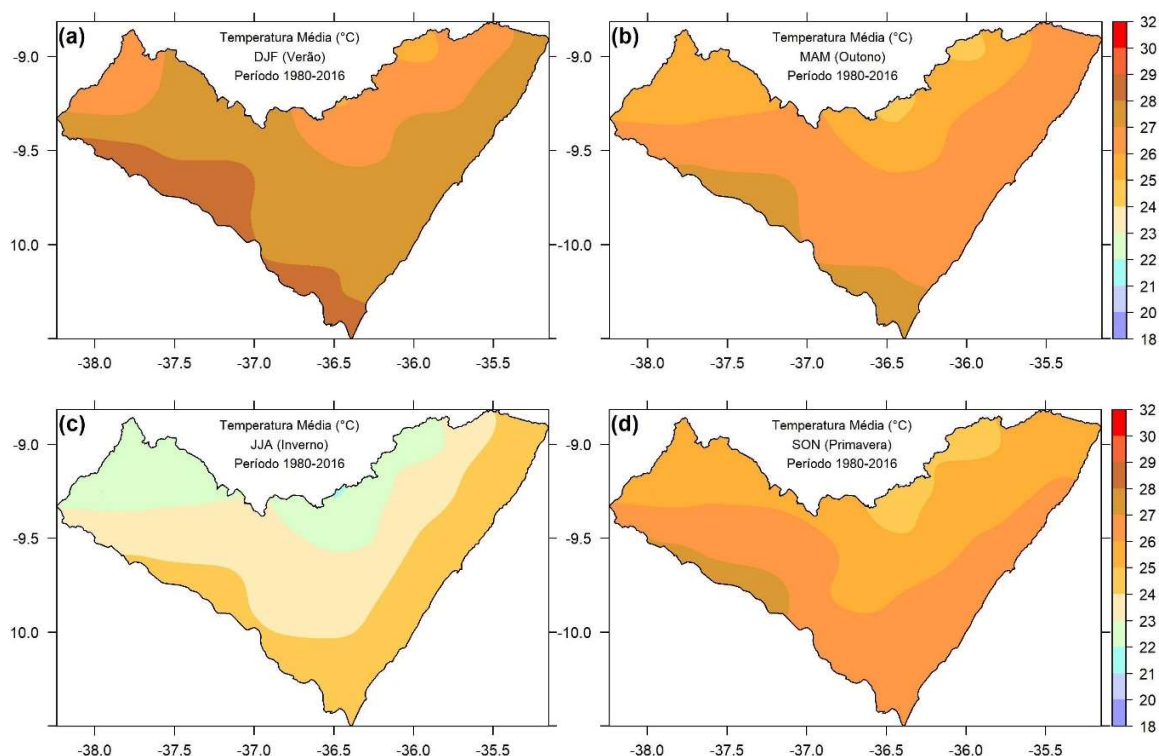


Figura 3: Climatologia da temperatura média em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.

A climatologia da umidade relativa mostra um gradiente leste-oeste (mais úmido-mais seco), dependente da proximidade do oceano Atlântico do que à temperatura média, mais baixas no verão (Figura 4a) e primavera (Figura 4d). Com as chuvas mais concentradas no outono-inverno (GOMES et al., 2019), naturalmente as taxas médias de umidade aumentam no outono consideravelmente em relação ao verão, com valores de 72 a 80% (Figura 4b), e atingem seus máximos médios no inverno, com a maior parte de Alagoas experimentando valores médios

entre 80 a 85% (Figura 4c).

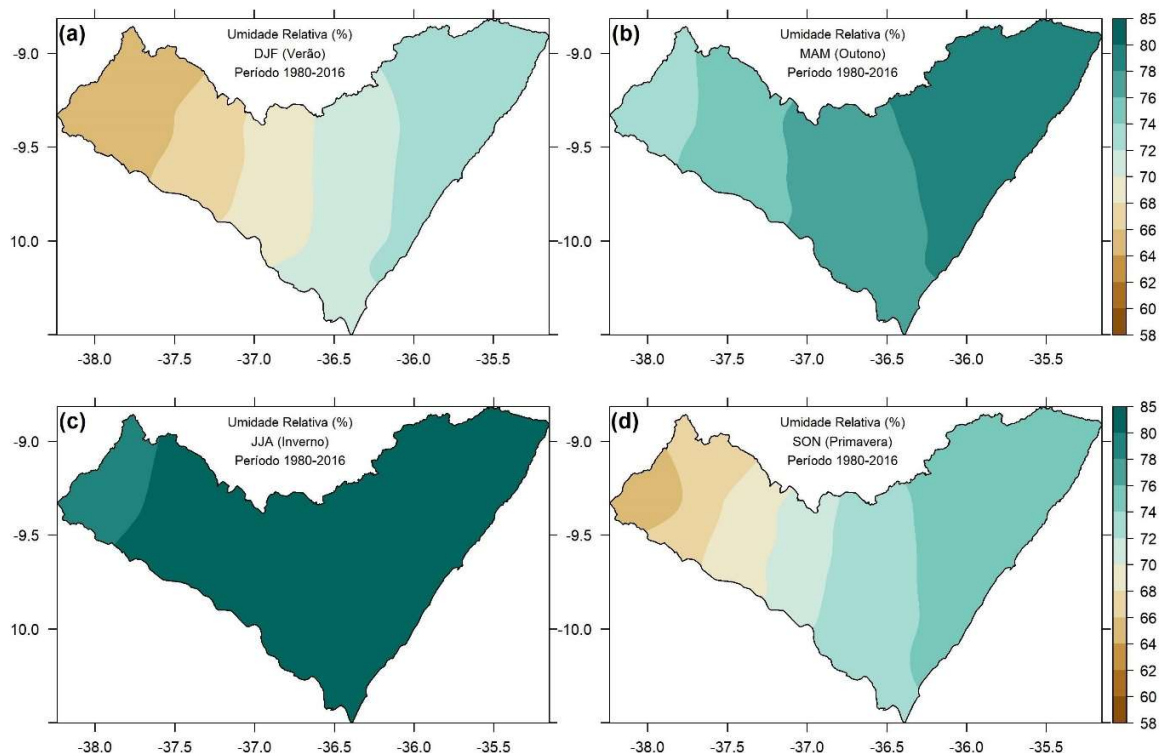


Figura 4: Climatologia da umidade relativa em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.

A Figura 5 sintetiza a média anual da temperatura média (Figura 5a) e da umidade relativa (Figura 5b). Percebe-se gradientes distintos entre as variáveis, com a temperatura variando de norte a sul do estado, com valores a partir de 24°C no norte e ultrapassando 27°C no sul. A umidade apresenta um gradiente Leste-Oeste, mais úmido a leste com médias anuais próximas de 80% e menos úmido a oeste com médias anuais próximas a 70%.

Este resultado, apesar de simples e descritivo, é interessante pois já permite inferir combinações interessantes para o cálculo dos índices biometeorológicos, com áreas mais quentes e úmidas, mais quentes e secas, e mais amenas e úmidas e também mais amenas e secas.

SILVA et al. (2022), calcularam o HI a dados horários da estação automática de Pão de Açúcar, no sertão alagoano. Esse município é considerado um dos mais quentes de Alagoas, na divisa com Sergipe. Os autores verificaram que há uma

frequência muito alta de horas no dia que exigem cuidado extremo para hipertermia.

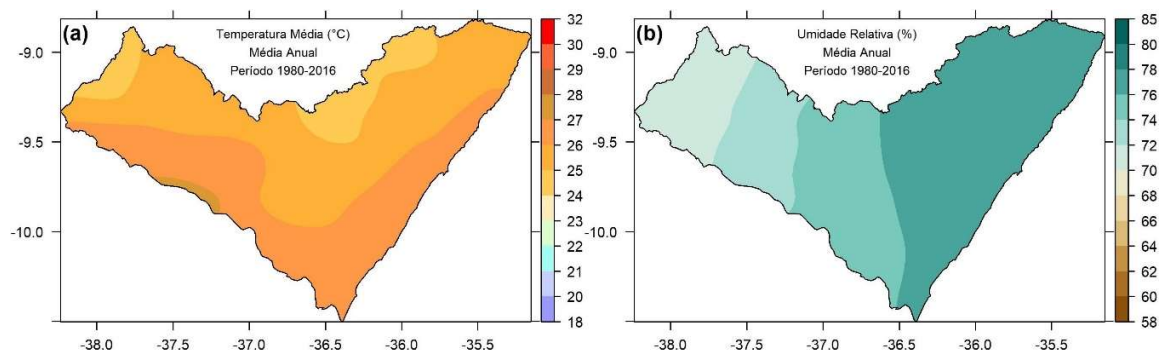
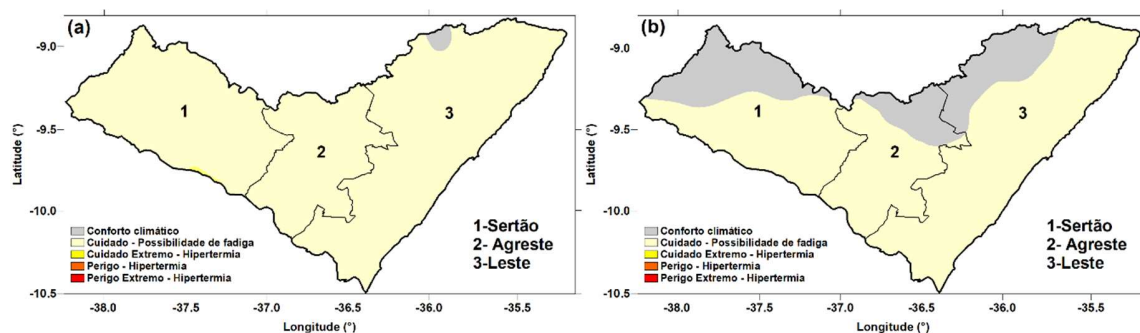


Figura 5: Climatologia anual da (a) temperatura média e (b) umidade relativa. Período: 1980-2016.

4.1 HEAT INDEX (HI)

A Figura 6a mostra que, em média, praticamente toda a população do estado de Alagoas deve estar atenta para possibilidade de fadiga no verão, com uma pequena faixa ao sul do sertão na fronteira com Sergipe sob cuidado extremo para hipertermia. No outono (Figura 6b), predomina a indicação de cuidado com possibilidade de fadiga em todo centro-sul de Alagoas, com exceção de porções ao norte das mesorregiões sertão e agreste, e noroeste da faixa leste.

No inverno (Figura 6c), todo o estado experimenta condições médias de conforto térmico, retornando as condições de cuidado para possibilidade de fadiga na maior parte do estado na primavera (Figura 6d), com áreas menores de conforto em partes do sertão, agreste e leste como verificado no outono, só que em menores proporções.



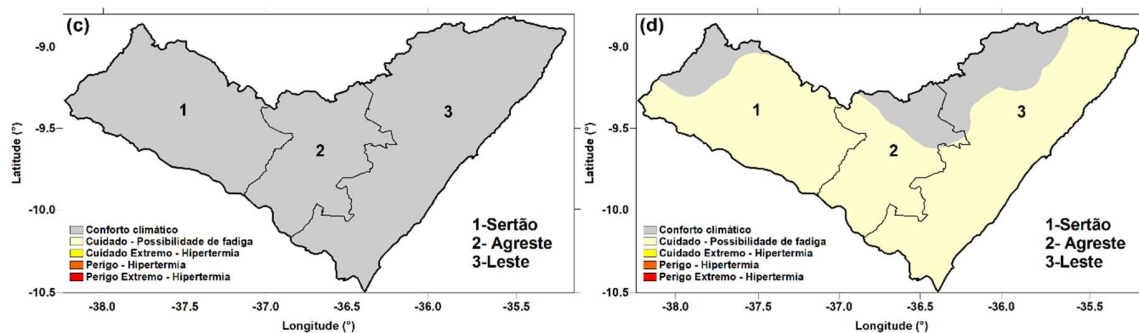
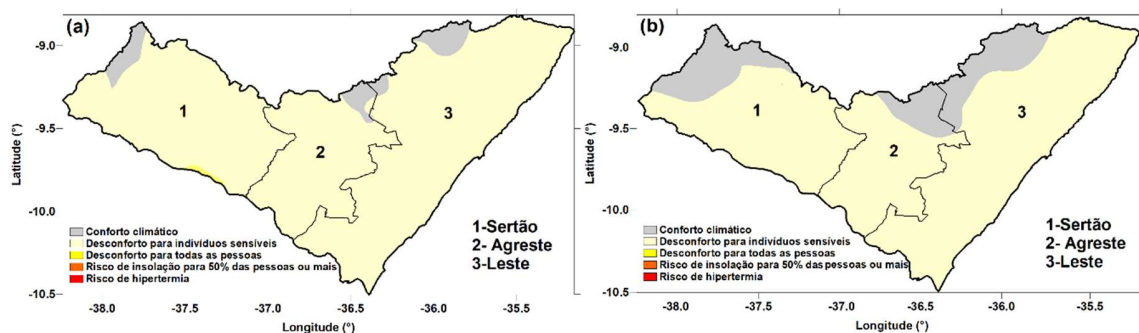


Figura 6: Climatologia do HI em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.

4.2 RELATIVE STRAIN INDEX (RSI)

O RSI apresenta pequenas áreas nas três mesorregiões de Alagoas com condições médias de conforto climático no verão (Figura 7a), porém com predominância de indicação de desconforto para pessoas sensíveis, e de desconforto para todas as pessoas na mesma área do sertão em que o HI indicou cuidado extremo para hipertermia. As condições do RSI no outono (Figura 7b) indicam desconforto para pessoas sensíveis na maior parte do estado com exceção de porções ao norte das mesorregiões sertão, agreste e leste, que indicam conforto. A Figura 7c mostra que o inverno é a estação de conforto climático, e a Figura 7d mostra um resultado contrastante em relação à primavera quando comparada ao HI: predominância de condições de conforto climático excetuando-se áreas ao sul do sertão e agreste, e central e sul do leste com desconforto para indivíduos sensíveis.



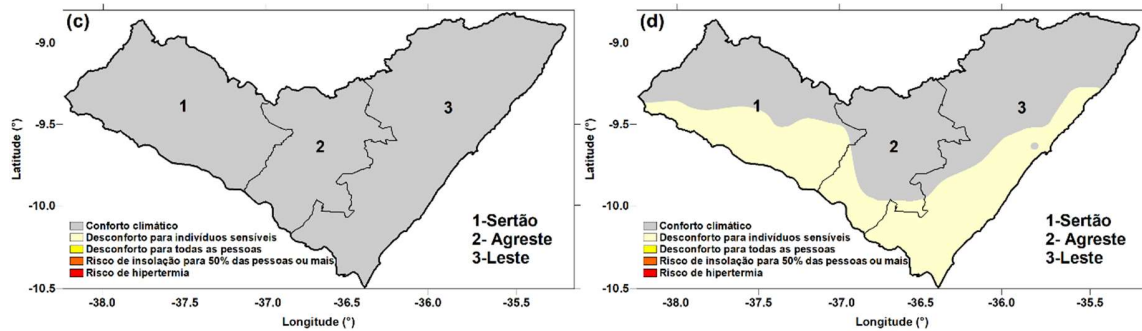


Figura 7: Climatologia do RSI em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.

4.3 TEMPERATURE-HUMIDITY INDEX (THI)

O THI é um dos índices mais indicados para avaliação de condições de conforto ao ar livre em regiões tropicais (BANC et al., 2020), desenvolvido para avaliar condições médias quente e muito quentes do ano. É dividido em três faixas principais: a primeira de conforto, onde 100% das pessoas sentem-se confortáveis, a segunda de meio conforto, onde 50% das pessoas sentem-se confortáveis, e a terceira de desconforto, onde 100% das pessoas sentem-se desconfortáveis pelo calor.

Esse índice que no verão (Figura 8a), uma grande parte de Alagoas apresenta situação de desconforto para a totalidade das pessoas, ao sul das mesorregiões do sertão, agreste e leste, com outra parcela da população sentindo-se meio confortável em praticamente toda a porção central de Alagoas, desde o leste ao sertão, e uma pequena parte da população sente condições médias de conforto em áreas pontuais no extremo oeste do sertão, e entre agreste e leste. Essas pequenas áreas de conforto observadas no verão se expandem em direção ao centro do Estado, e aumenta também a área de abrangência da sensação meio confortável, com a áreas de desconforto restringindo-se a partes de Alagoas na divisa com Sergipe no outono (Figura 8b).

No inverno (Figura 8c), o índice indica para a totalidade da população com sensação de conforto, e a Figura 8d mostra que essa sensação do inverno predomina na primavera, com pequenas áreas na divisa com Sergipe apresentando sensação de meio conforto para a população.

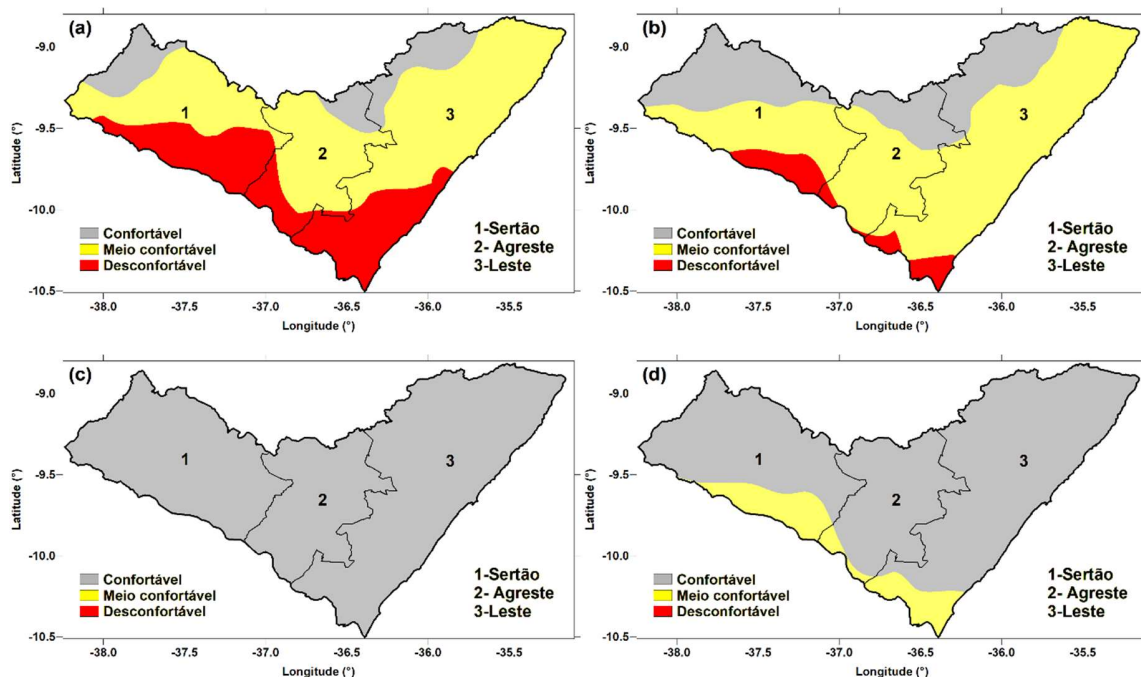


Figura 8: Climatologia do THI em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.

4.4 WET-BULB GLOBE TEMPERATURE (WBGT)

O WBGT é um dos índices mais confiáveis e amplamente aceito e usado em todo o mundo (MAZLOMI et al., 2017), indicado especialmente para avaliar riscos às atividades realizadas ao ar livre (BITENCOURT et al., 2020), por relacionar risco com a atividade metabólica humana. Esse índice aponta para risco de moderado a alto, com atividade metabólica moderada, áreas do centro-leste alagoano nas estações de verão (Figura 9a) e outono (Figura 9b), com as outras áreas apresentando risco moderado relacionado ao metabolismo.

Diferente dos índices anteriores, que apontaram de forma unânime o inverno como uma estação de conforto climático, o WBGT aponta para risco moderado no centro-sul e leste no inverno (Figura 9c), com áreas de baixo risco no centro-norte alagoano. Para a primavera, o WBGT classifica quase todo o estado na classificação de risco moderado, com taxa de metabolismo de moderada a alta (Figura 9d).

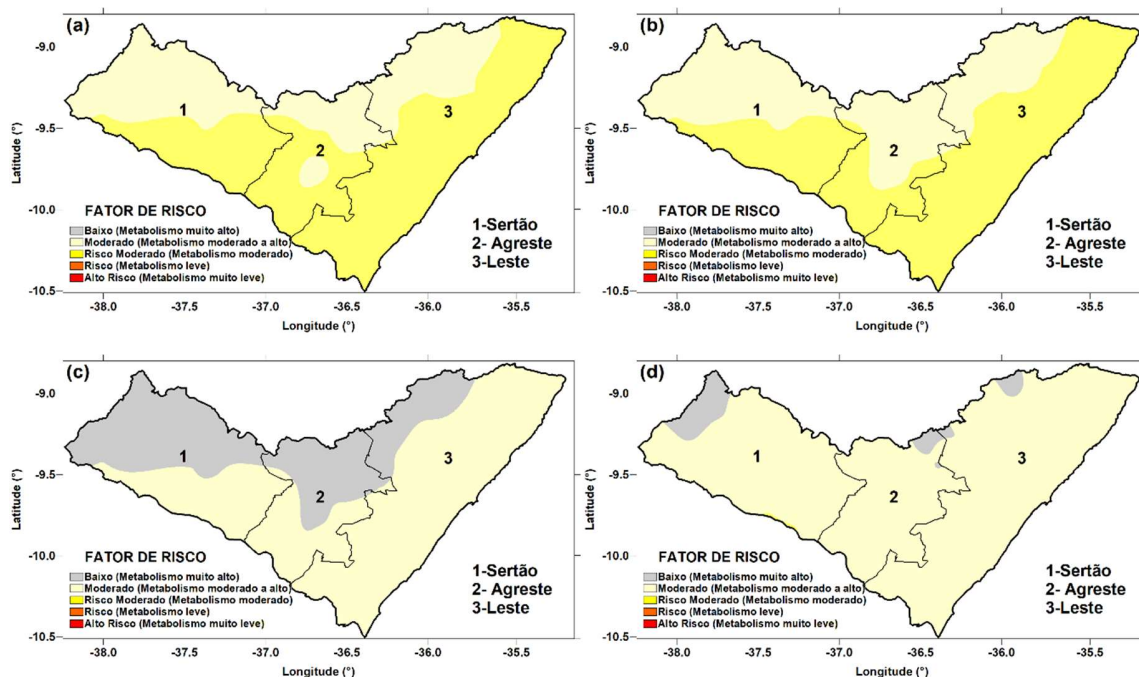


Figura 9: Climatologia do WBGT em Alagoas no (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. Período: 1980-2016.

Os resultados dos índices apresentados aqui mostraram resultados relativamente parecidos, mas não totalmente similares entre si. As maiores similaridades entre os índices encontram-se em duas áreas de Alagoas: ao norte e ao sul. Ao norte, áreas das três mesorregiões apresentaram situações de conforto mesmo, que em pequenas porções do território, em todas as estações do ano. Na porção mais ao sul/sudoeste do Estado, na fronteira com Sergipe pelo Rio São Francisco, todos os índices indicaram situação de cuidado para hipertermia/desconforto para pessoas sensíveis ao desconforto pelo calor/risco moderado a alto (HI/RSI/THI/WBGT). Esses resultados são reflexo da combinação de temperatura e umidade, entre outros fatores não analisados aqui, como o vento, mas que tem sua influência computada implicitamente em alguns dos índices, como o WBGT.

Uma alta relação do comportamento dos índices se dá com a topografia de Alagoas. A Figura 10 mostra o mapa hipsométrico, obtido da Secretaria de Estado do Planejamento e do Desenvolvimento Econômico (SEPLAG) do Governo do

Estado de Alagoas (acessado em 20/02/2022 e disponível em: <https://dados.al.gov.br/catalogo/hu/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial>). O mapa mostra que as áreas do estado onde predominam condições médias de conforto em todos índices, nas três mesorregiões, localizam-se em áreas de relevo elevado, com altitudes superiores aos 500m, a maior parte em áreas limítrofes do estado de Pernambuco. Já as áreas onde predominaram situações de alerta, delimitam-se com o rio São Francisco com altitudes de 0-50m.

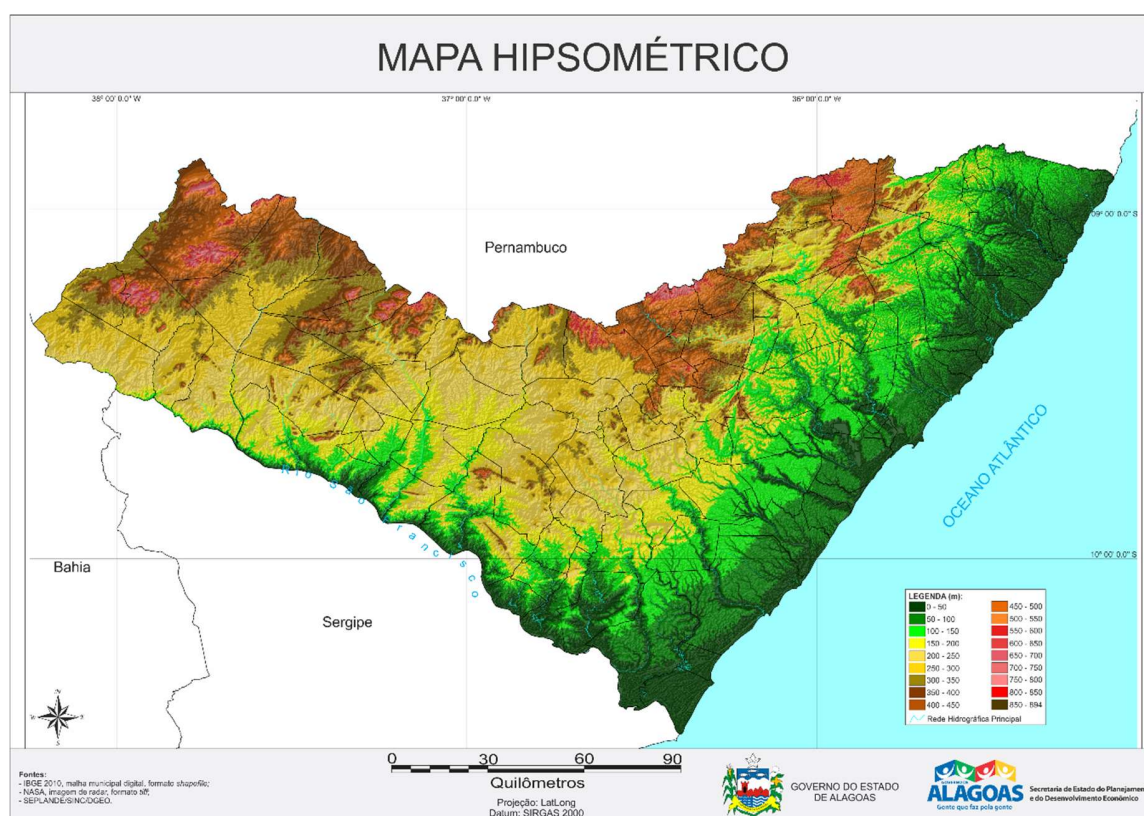


Figura 10: Hipsometria do estado de Alagoas. Fonte: <https://dados.al.gov.br/>.

A Figura 11 mostra a média anual de todos os índices, tornando mais evidente essa relação com a topografia. Há enorme similaridade nas médias anuais dos índices HI (Figura 11a) e RSI (Figura 11b), com as porções de topografia mais altas do estado relacionadas, em uma média anual, a predominância de conforto climático, em detrimento de áreas que exigem cuidado para a possibilidade de fadiga e desconforto para indivíduos sensíveis, nas áreas de relevo menos elevado da faixa leste e próximos a dívida com Sergipe pelo rio São Francisco. O THI (Figura

11c) corrobora esses resultados do HI e RSI, apontando as áreas de cuidado e desconforto a uma predominância de ao menos 50% da população estar exposta a uma sensação de desconforto térmico durante o ano. O WBGT (Figura 11d), é o único dos índices que apresenta, para a maior parte do Estado, um fator de risco moderado a alto para atividades de exposição ao ar livre, mas também reserva para algumas áreas do sul do Estado o risco moderado para alteração do metabolismo.

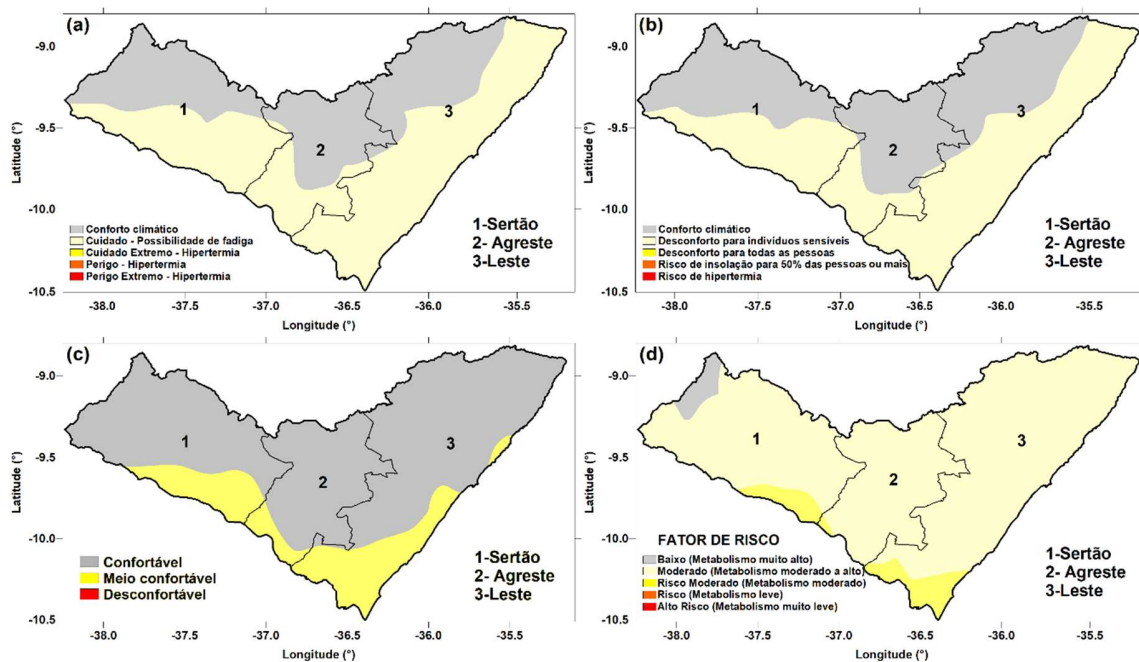


Figura 11: Climatologia anual do (a) HI, (b) RSI, (c) THI e (d) WBGT. Período: 1980-2016.

Todos os índices apresentados nesse trabalho tem amplo espectro de aplicação em diversas partes do mundo. O HI foi desenvolvido pela NOAA com a finalidade de alertar as pessoas para situações de risco para ondas de calor que geralmente acontecem no verão do hemisfério norte. Amplamente utilizado na América do Norte, também é muito utilizado em países como Portugal como indicador potencial de riscos de incêndios florestais (PEREIRA et al., 2005; CARVALHO et al., 2008).

O THI tem sido utilizado na Europa para compreender situações de conforto térmico urbano relacionados às atividades turísticas, CIOBOTARU et al. (2018) mostraram que o THI evidenciou, de 2001 a 2016, aumento de casos de desconforto

pelo calor no verão, e pelo frio no inverno. Ainda para a Romênia, o THI fez parte de um estudo de mais longo prazo para avaliar as condições bioclimáticas gerais que passaram por mudanças entre 1961-2016 (BANC et al., 2020), com a conclusão geral de diminuição dos dias considerados confortáveis, pois o clima tornou-se mais ameno no inverno e mais quente no verão.

O RSI foi aplicado para evidenciar o surgimento de ilha de calor urbana no Sri Lanka (EMMANUEL, 2005). Em outro estudo, ASGHARI et al. (2020), concluíram que o RSI é pouco indicado para regiões extremamente quentes e secas. Uma de suas aplicações mais interessantes é na avaliação das taxas de mortalidade associadas a grupos de alto risco para o calor em regiões de clima temperado. GARÍN e BEJARÁN (2003) notaram que aproximadamente 10% da variância associadas a diferentes causas de mortalidade em Buenos Aires podem ser explicados pelos valores do RSI, após analisar que mais de 75% de um total de 1400 horas que estiveram sob condições de desconforto.

Por fim, o WBGT é, atualmente, um dos índices mais utilizados para avaliação de condições de conforto/estresse térmico. OLIVEIRA et al. (2021) analisaram o WBGT sob condições de mudança do uso da terra na bacia amazônica sob processo de savanização, e concluíram que o índice de estresse térmico associado aos fatores de alto risco do WBGT pode exceder o limite de adaptação humana até 2100 sob os efeitos combinados do desflorestamento e mudanças climáticas. Para a região da bacia do Rio São Francisco, OLIVEIRA et al. (2019) também mostraram que, para os cenários climáticos RCP 4.5 E 8.5, o número médio de dias com valores do WBGT acima do percentil 90 deve ser incrementado, aumentando consideravelmente o número de dias associados a risco de estresse pelo calor. BITENCOURT et al. (2020) analisaram o WBGT para condições atuais e futuras no Brasil, para as condições recentes, de 1961 a 2010, verificaram que houve aumento na frequência e na tendência de períodos quentes associados às classes de risco do WBGT, e que essa proporção deve aumentar no futuro sob condições de cenários de emissões moderadas e altas, respectivamente.

Diante dos resultados apresentados nesse trabalho, e mostrados para outras partes do mundo e também no Brasil, espera-se que o estado de Alagoas opte por

normalizar as análises de índices de conforto térmico para fins de prevenção de casos graves relacionados a saúde principalmente dos que trabalham expostos ao ar livre, em diversos setores socioeconômicos importantes para o estado, como o agrícola, de turismo e serviços em geral.

5 CONCLUSÃO

Climatologias sazonais e anual de quatro índices de conforto térmico foram obtidas para o estado de Alagoas relativas ao período 1980-2016. Temperatura média e umidade relativa foram utilizadas, direta e indiretamente, na obtenção dos índices. Diante disso, uma análise preliminar da climatologia dessas variáveis revelou dois gradientes distintos: a temperatura em Alagoas aumenta em direção norte para sul, e a umidade relativa de leste para oeste. A temperatura responde diretamente as condições de relevo locais, enquanto a umidade pela proximidade oceânica.

Duas estações do ano apresentam resultados totalmente contrastantes. No verão predominam as classes de atenção/cuidado/risco de todos os índices analisados em relação ao desconforto pelo calor e sua relação com ondas de calor (HI), de atenção a indivíduos sensíveis (RSI e THI), e a atividades em áreas abertas (WBGT). O inverno é a estação em que predomina o conforto térmico, com exceção do índice WBGT, que indica risco moderado relacionado as atividades metabólicas no setor mais quente de Alagoas.

Outono e primavera geralmente apresentam comportamentos similares dos índices, principalmente nas áreas relacionadas a conforto e cuidados relacionados a possibilidade de fadiga do HI e desconforto para indivíduos sensíveis, como idosos e crianças pelo RSI.

O índice THI foi o único a apresentar uma área generalizada de desconforto pelo calor no sul do estado, na região fronteira à Sergipe limitada pelo rio São Francisco, associada as baixas altitudes observadas, que não ultrapassam 50m. Diante desses resultados, Alagoas possui essa como a principal área do Estado relacionada ao desconforto/estresse por calor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASGHARI, M.; GHALHARI, G. F.; ABBASINIA, M.; SHAKERI, F.; TAJIK, R.; GHANNADZADEH, M. J. Feasibility of Relative Strain Index (RSI) for the Assessment of Heat Stress in Outdoor Environments: Case Study in Three Different Climates of Iran. **The Open Ecology Journal**, 13: 11-18, 2020.

BANC, S.; CROITORU, A-E.; DAVID, N. A.; Scripca, A-S. Changes Detected in Five Bioclimatic Indices in Large Romanian Cities over the Period 1961–2016. **Atmosphere**, 11: 819, 2020.

BITENCOURT, D. P.; ALVES, L. M.; SHIBUYA, E. K.; CUNHA, I. A.; SOUZA, J. P. E. Climate change impacts on heat stress in Brazil—Past, present, and future implications for occupational heat exposure. **International Journal of Climatology**, 41 (S1): E2741-E2756, 2021.

BLAZEJCZYK, K.; EPSTEIN, Y.; JENDRITZKY, G.; STAIGER, H.; TINZ, B. Comparison of UTCI to selected thermal indices. **International Journal of Biometeorology**, 56: 515–535, 2012.

BRÖDE, P.; KRÜGER, E. L.; ROSSI, F. A.; FIALA, D. Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI—a case study in Southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, 56:471–480, 2012.

BROEDE, P.; BLAZEJCZYK, K.; FIALA, D.; HAVENITH, G.; HOLMER, I.; JENDRITZKY, G.; KUKLANE, K.; KAMPMANN, B. The universal thermal climate index UTCI compared to ergonomics standards for assessing the thermal environment. **Industrial Health**, 51: 16–24, 2013.

CARVALHO, A.; FLANNIGAN, M. D.; LOGAN, K.; MIRANDA, A. I.; BORREGO, C. Fire activity in Portugal and its relationship to weather and the Canadian Fire

Weather Index System. **International Journal of Wildland**, 17: 328–338, 2008.

CHOWDHURY, S.; HAMADA, Y.; AHMED, K. S. Prediction and comparison of monthly indoor heat stress (WBGT and PHS) for RMG production spaces in Dhaka, Bangladesh. **Sustainable Cities and Societys**, 29: 41–57, 2017.

CIOBOTARU, A-M.; ANDRONACHE, I.; DEY, N.; PETRALLI, M.; DANESHVAR, M. R. M.; WANG, Q.; RADULOVIC, M.; PINTILII, R-D. Temperature-Humidity Index described by fractal Higuchi Dimension affects tourism activity in the urban environment of Focșani City (Romania). **Theoretical and Applied Climatology**, 2018. doi:10.1007/s00704-018-2501-x.

COFFEL, E. D.; HORTON, R. M.; DE SHERBININ, A. Temperature and humidity-based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century. **Environmental Research Letters**, 13: 14001, 2018.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; DA ROCHA JÚNIOR, R. L.; SALVADOR, M. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, 28: 100254, 2020a.

COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; BAPTISTA, G. M. M.; DA ROCHA JÚNIOR, R. L.; HERDIES, D. L.; SILVA, V. P. R. Cenários de Mudanças Climáticas para a Região Nordeste do Brasil por meio da Técnica de Downscaling Estatístico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 35: 785-801, 2020b.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; DA ROCHA JÚNIOR, R. L.; NEDEL, A. S. Analysis of future climate scenarios for northeastern Brazil and implications for human thermal comfort. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, 93 (1): 1-23, 2021.

DA ROCHA JÚNIOR, R. L.; SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L.; GOMES, H. B.; HERDIES, D. L.; SILVA, V. P. R.; XAVIER, A. C. Analysis of the Space–Temporal Trends of Wet Conditions in the Different Rainy Seasons of Brazilian Northeast by Quantile Regression and Bootstrap Test. **Geosciences**, 9 (11): 457, 2019.

DEOSTHALI, V. Assessment of impact of urbanization on climate: an application of bio-climatic index. **Atmospheric Environment**, 33: 4125-4133, 1999.

DINIZ, F. R.; IWABE, C. M. N.; PIACENTI-SILVA, M. Valuation of the human thermal discomfort index for the five Brazilian regions in the period of El Niño-Southern Oscillation (ENSO). **International Journal of Biometeorology**, 2018. doi:10.1007/s00484-018-1622-3.

DINIZ, F. R.; GONÇALVES, F. L. T.; SHERIDAN, S. HeatWave and Elderly Mortality: Historical Analysis and Future Projection for Metropolitan Region of São Paulo, Brazil. **Atmosphere**, 11: 933, 2020.

EMMANUEL, R. Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. **Building and Environment**, 40: 1591–1601, 2005.

FANGER, P. O. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. **McGraw-Hill**, New York, 1970.

GARÍN, A.; BEJARÁN, R. Mortality rate and relative strain index in Buenos Aires city. **International Journal of Biometeorology**, 48(1): 31-6, 2003.

GOBO, J. P. A.; WOLLMANN, C. A.; CELUPPI, M. C.; GALVANI, E.; FARIA, M. R.; MENDES, D.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; MALHEIROS, T. S.; RIFFEL, E. S.; GONÇALVES, F. L. T. The bioclimate present and future in the state of São Paulo/ Brazil: Space-time analysis of human thermal comfort. **Sustainable Cities and**

Society, 78: 103611, 2022.

GOLBABAEI, F.; SHENDI, M. R. A.; MONAZZAM, M.R.; HOSSEINI, M.; AVVAL, M. Y. Investigation of heat stress based on WBGT index and its relationship with physiological parameters among outdoor workers of Shabestar city. **Journal of Health and Safety at Work**. 5 (2): 85–94, 2015.

GOMES, H.B.; AMBRIZZI, T.; PONTES DA SILVA, B. F.; HODGES, K.; SILVA DIAS, P. L.; HERDIES, D. L.; SILVA, M. C. L.; GOMES, H. B. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, 53 (3–4): 1393–1411, 2019.

HAJIZADEH, R.; FARHANG DEGHAN, S.; MEHRI, A.; GOLBABAEI, F.; BEHESHTI, M. H.; HAGHIGHATJOU, H. Heat stress assessment in outdoor workplaces of a hot arid climate based on meteorological data: a case study in qom, Iran. **Journal of Military Medicine**, 17: 89-95, 2015.

HAJIZADEH, R.; MEHRI, A.; JAFARI, S.; BEHESHTI, M.; HAGHIGHATJOU, H. Feasibility of esi index to assess heat stress in outdoor jobs. **Journal of Occupational And Environmental Health**, 2: 18-26, 2016.

HAVENITH, G.; FIALA, D. Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress. **In: Comprehensive Physiology**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. p. 255-302, 2015.

HEIDARI, H.; GOLBABAEI, F.; SHAMSIPOUR, A.; FORUSHANI, A. R.; GAEINI, A. Outdoor occupational environments and heat stress in IRAN. **Journal of Environmental Health Science & Engineering**, 2015. doi: 10.1186/s40201-015-0199-6.

IONAC, N.; CIULACHE, S. The bioclimatic stress in Dobrudja. **Present**

Environment And Sustainable Development, 1: 168-78, 2007.

JUNGES, A. L.; SANTOS, V. Y.; MASSONI, N. T. Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências**, 13 (5): 126-151, 2018.

KAKAMU, T.; WADA, K.; SMITH, D. R.; ENDO, S.; FUKUSHIMA, T. Preventing heat illness in the anticipated hot climate of the Tokyo 2020 Summer Olympic Games. **Environmental Health and Preventive Medicine**, 22(1): 68, 2017.

KAMPMANN, B.; BRÖDE, P.; FIALA, D. Physiological responses to temperature and humidity compared to the assessment by UTCI, WBGT and PHS. **International Journal of Biometeorology**, 56: 505–513, 2012.

KAYWHITE, M.; HODOUS, T. K.; VERCRUYSSSEN, M. Effects of thermal environment and chemical protective clothing on work tolerance, physiological responses, and subjective ratings. **Ergonomics**, 34: 445–457, 1991.

KYLE, W. Summer and winter patterns of human thermal stress in Hong Kong. In: Kyle, W., Chang, CP., (Eds.), **Proceedings of the 2nd Int. Conference on east asia, and western pacific meteorology and climate**, Hong Kong 557-83, 1992.

LEMKE, B.; KJELLSTROM, T. Calculating workplace WBGT from meteorological data: a tool for climate change assessment. **Industrial Health**, 50: 267-278, 2012.

LEROYER, S.; BÉLAIR, S.; SPACEK, L.; GULTEPE, I. Modelling of radiation-based thermal stress indicators for urban numerical weather prediction. **Urban Climate**, 25: 64-81, 2018.

LILJEGREN, J. C.; CARHART, R. A.; LAWDAY, P.; TSCHOPP, S.; SHARP, R. Modeling the Wet Bulb Globe Temperature Using Standard Meteorological

Measurements. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, 5: 645-655, 2008.

LIU, B.; LIU, F.; WANG, C.; MEI, S. Unit commitment considering flexibility and uncertainty of wind power generation. **Power System Technology**, 39: 730–736, 2015.

MALCHEVA, K.; BOCHEVA, L.; CHERVENKOV, H. Climatology of extremely hot spells in Bulgaria (1961-2019). **20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM**, 16-25 August 2020, Albena, Bulgaria.

MAURELLIS, A.; TENNYSON, J. The climatic effects of water vapour. In **Physics World (physicsweb.org)**: 1-5, 2003

MAZLOMI, A.; GOLBABAEI, F.; FARHANG DEGHAN, S.; ABBASINIA, M.; MAHMOUD KHANI, S.; ANSARI, M.; HOSSEINI, M. The influence of occupational heat exposure on cognitive performance and blood level of stress hormones: A field study report. **International Journal of Occupational Safety and Ergonomics**, 23(3): 431-9, 2017.

MOHAN, M.; GUPTA, A.; BHATI, S. A modified approach to analyze thermal comfort classification. **Atmospheric and Climate Sciences**, 4: 7–19, 2014.

NIEUWOLT, S. Tropical Climatology: an Introduction to the Climates of the Low Latitudes. **Wiley**, New York (US), 1977.

OLIVEIRA, B. F. A.; SILVEIRA, I. H.; FEITOSA, R. C.; HORTA, M. A. P.; JUNGER, W. L.; HACON, S. Human Heat stress risk prediction in the Brazilian semiarid Region based on the Wet-Bulb Globe Temperature. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 91 (3): e20180748, 2019.

OLIVEIRA, B. F. A.; BOTTINO, M. J.; NOBRE, P.; NOBRE, C. A. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Nature Communications Earth & Environment**, 2: 207, 2021.

PEREIRA, M. G.; TRIGO, R. M.; DA CAMARA, C. C.; PEREIRA, J. M. C.; LEITE, S. M. Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. **Agricultural and Forest Meteorology**, 129: 11–25, 2005.

PRADHAN, B.; SHRESTHA, S.; SHRESTHA, R.; PRADHANANG, S.; KAYASTHA, B.; PRADHAN, P. Assessing climate change and heat stress responses in the Tarai region of Nepal. **Industrial Health**, 51: 101–112, 2013.

REGOTO, P.; DERECHYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, 41 (11): 5125-5142, 2021.

ROTHFUSZ, L.P. The Heat Index “Equation” (or, More Than You Ever Wanted to Know About Heat Index). U.S. National Weather Service, **Technical Attachment SR 90-23**, 1990.

SHEFFIELD, P. E.; HERRERA, J. G. R.; LEMKE, B.; KJELLSTROM, T.; ROMERO, L. E. B. Current and future heat stress in Nicaraguan work places under a changing climate. **Industrial Health**, 51: 123–127, 2013.

SILVA, F. D. S.; GOMES, H. B. ; COSTA, R. L. ; MELO, M. L. D. ; LINS, M. C. C. Evolução Temporal do Índice de Conforto Térmico (Heat Index) em um Município do Semiárido Alagoano. In: XXI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Campina Grande-PB. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2021.

SILVA, I. R.; NEDEL, A. S.; MARQUES, J. R. Q.; NOLASCO JÚNIOR, L. R. Excess of children’s outpatient consultations due to asthma and bronchitis and the

association between meteorological variables in Canoas City, Southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, 63 (11): 1517-1524, 2018.

STEADMAN, R. G. The assessment of sultriness. Part I: a temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. **Journal of Applied Meteorology**, 18: 861–873, 1979a.

STEADMAN, R. G. The assessment of sultriness. Part II: effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature. **Journal of Applied Meteorology**, 18: 874–885, 1979b.

STEADMAN, R. G. A universal scale of apparent temperature. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 23: 1674–1687, 1984.

THOM, E. C. The Discomfort Index. **Weatherwise**, 12: 57-60, 1959

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, 36: 2644-2659, 2016.

YAGLOU, C. P.; MINARD, D. “Control of Heat Casualties at Military Training Centers”. **Archives of Industrial Health**, 16: 302-305, 1957.

ZAMANIAN, Z.; SEDAGHAT, Z.; HEMEHREZAEI, M.; KHAJEHNASIRI, F. Evaluation of environmental heat stress on physiological parameters. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, 15 (1): 1-8, 2017.

ZARE, S.; HASHEMINEJAD, N.; SHIRVAN, H. E.; HEMMATJO, R.; SAREBANZADEH, K.; AHMADI, S. Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. **Weather and Climate Extremes**, 19: 49–57, 2018a.

ZARE, S.; HASHEMINEZHAD, N.; SAREBANZADEH, K.; ZOLALA, F.; HEMMATJO, R.; HASSANVAND, D. Assessing thermal comfort in tourist attractions through objective and subjective procedures based on ISO 7730 standard: a field study. **Urban Climate**, 26: 1–9, 2018b.

ZARE, S.; SHIRVAN, H. E.; HEMMATJO, R.; NADRI, F.; JAHANI, Y.; JAMSHIDZADEH, K.; PAYDAR, P. A comparison of the correlation between heat stress indices (UTCI, WBGT, WBDT, TSI) and physiological parameters of workers in Iran. **Weather and Climate Extremes**, 26: 100213, 2019.

