

Ondas de calor e estresse térmico humano severo na Região Norte do Brasil: comparação entre diferentes bases de dados e sob perspectiva socioespacial

Heatwaves and severe human heat stress in the North Region of Brazil: a comparison of different datasets from a socio-spatial perspective

Tiago Bentes Mandú 

Mestre em Meteorologia
Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
tiagobentes1@gmail.com

Marcia Sabrina Lima de Aguiar 

Mestra em Sociedade, Ambiente e Qualidade de Vida
Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
sabrinalimafr@gmail.com

Eduardo Almeida da Silva 

Doutorando em Ciências Climáticas
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil
eduardometeorologistaufrn@gmail.com

Ana Carla dos Santos Gomes 

Doutora em Ciências Climáticas
Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil
anacarlasg02@gmail.com

Resumo

Ondas de calor constituem um risco crescente à saúde humana em regiões tropicais úmidas, onde a combinação de temperatura elevada, umidade e desigualdade socioespacial intensifica o estresse térmico. Este estudo avaliou o impacto das ondas de calor sobre o conforto térmico humano na Região Norte do Brasil, integrando dados de temperatura máxima diária do INMET, do ERA5-Land e do UTCI/ERA5-HEAT. Foram analisadas 23 estações no período de 1995 a 2025 para INMET e ERA5-Land e entre 2010 e 2025 para o UTCI (ERA5-HEAT). Ondas de calor foram definidas pelo percentil 90 diário e pela duração mínima de três dias consecutivos. O impacto foi avaliado por meio do UTCI_{max}, do número de dias com UTCI ≥ 38 °C, da excedência em relação ao P90 local, da carga térmica acumulada e do índice de prioridade socioespacial. Os



<https://doi.org/10.28998/contegeo.11i.26.21441>

Artigo publicado sob a [Licença Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Submetido em: 12/03/2026

Aceito em: 08/07/2026

Publicado: 12/08/2026

e-Location: 21441

resultados indicam que as ondas de calor aumentam o UTCI_{max} e a probabilidade de ocorrência de calor muito forte em todas as classes de vulnerabilidade. As cidades de Peixe, Taguatinga, Conceição do Araguaia, Lábrea, Manaus e Monte Alegre apresentaram prioridade muito alta, sugerindo que o risco térmico resulta da interação entre exposição, severidade dos eventos e vulnerabilidade.

Palavras-chave: ondas de calor; conforto térmico humano; vulnerabilidade socioespacial; Amazônia brasileira.

Abstract

Heatwaves are an increasing health risk in humid tropical regions, where high temperature, humidity and socio-spatial inequality intensify human heat stress. This study assessed the effect of heatwaves on human thermal comfort in Northern Brazil by integrating daily maximum temperature from INMET, ERA5-Land and UTCI/ERA5-HEAT. Twenty-three stations were analyzed from 1995 to 2025 for INMET and ERA5-Land, and 22 stations from 2010 to 2025 for UTCI. Heatwaves were defined using a daily 90th-percentile threshold and a minimum of three consecutive days. Thermal impact was evaluated using daily maximum UTCI, days with UTCI ≥ 38 °C, local UTCI-P90 exceedance, accumulated severe heat load and a socio-spatial priority index. Results show that heatwaves shift UTCI_{max} toward higher values and increase the probability of very strong heat stress across vulnerability classes. Peixe, Taguatinga, Conceição do Araguaia, Lábrea, Manaus and Monte Alegre emerged as very high-priority locations, indicating that thermal risk results from the interaction between exposure, event severity and socio-spatial vulnerability.

Keywords: heatwaves; human thermal comfort; socio-spatial vulnerability; Brazilian Amazon.

INTRODUÇÃO

As ondas de calor representam um dos extremos climáticos de maior relevância social, pois envolvem temperaturas anormalmente elevadas e persistência suficiente para impactar a saúde, a infraestrutura, o setor energético e os ecossistemas (Meehl e Tebaldi, 2004; Perkins et al., 2012; Perkins e Alexander, 2013; Perkins-Kirkpatrick e Lewis, 2020; Seneviratne et al., 2021; Domeisen et al., 2023). Estudos recentes apontam para o aumento da ocorrência, frequência, duração e intensidade desses eventos em diversas regiões, incluindo áreas tropicais e de baixa latitude, onde elevações, mesmo que baixas, de temperatura podem levar a população a se aproximar de limites fisiológicos críticos.

O impacto do calor extremo sobre a saúde decorre da sobrecarga dos mecanismos de termorregulação, incluindo sudorese, vasodilatação e manutenção da hidratação. Em situações de calor persistente e elevada umidade, a eficiência desses

mecanismos é significativamente reduzida, o que eleva os riscos cardiovasculares, respiratórios, renais, metabólicos e de mortalidade, especialmente entre idosos, crianças, trabalhadores expostos e populações socialmente vulneráveis (Hajat e Kosatky, 2010; Campbell et al., 2018; Jay et al., 2021; Zhao et al., 2019; Chen et al., 2025; Siddiqui et al., 2025; Zhou et al., 2025).

Em escala global, estudos como o de Wang et al. (2024) identificam um aumento das ondas de calor e do calor percebido, resultando em impactos significativos na saúde pública e no planejamento urbano (Almeida et al., 2026). Na Região Norte, o risco é intensificado pela combinação de clima quente e úmido, desigualdade socioespacial, baixa cobertura de serviços, queimadas, secas e elevada heterogeneidade territorial, como demonstrado pelos recentes eventos de seca e calor na Amazônia (Butt et al., 2023). A análise da influência da desigualdade socioespacial é essencial para o desenvolvimento de intervenções eficazes e direcionadas.

A avaliação do risco térmico humano requer a consideração de variáveis ambientais adicionais à temperatura máxima do ar. O Índice Universal de Clima Térmico (Universal Thermal Climate Index, UTCI) integra temperatura, umidade, vento e radiação para representar a resposta fisiológica humana ao ambiente térmico (Jendritzky et al., 2012; Bröde et al., 2012; Fiala et al., 2012). Essa abordagem é particularmente relevante na Amazônia, onde a umidade constitui uma variável fundamental e pode intensificar o calor percebido, mesmo quando a temperatura do ar não atinge valores extremos (Di Napoli et al., 2020; Di Napoli et al., 2021).

Apesar de sua relevância no clima global, a Amazônia ainda apresenta baixa densidade de estações meteorológicas e séries observacionais descontínuas. Diante dessa dificuldade, produtos de reanálise, como o ERA5-Land e o ERA5-HEAT, são úteis para complementar observações, desde que avaliados de forma crítica. A utilização de reanálise reforça a confiabilidade dos resultados, especialmente em regiões com dados limitados, o que é essencial para o público técnico e científico.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o impacto das ondas de calor sobre o estresse térmico humano severo na Região Norte do Brasil, integrando dados observacionais do INMET, estimativas de temperatura máxima do ERA5-Land e o índice UTCI derivado do ERA5-HEAT. Especificamente, busca-se comparar a ocorrência e a intensidade das ondas de calor identificadas por diferentes bases climáticas, analisar sua relação com o aumento do UTCI_{max} e da frequência

de dias com estresse térmico severo, bem como identificar áreas prioritárias de risco a partir da combinação entre exposição térmica, severidade dos eventos e vulnerabilidade socioespacial. Com isso, pretende-se contribuir para o aprimoramento do monitoramento climático e para o planejamento de estratégias de adaptação ao calor extremo na Amazônia brasileira.

METODOLOGIA

Área de estudo e divisão socioespacial

O estudo foi realizado na região Norte do Brasil, onde a dimensão socioespacial foi incorporada à análise como variável territorial de contextualização, independentemente das séries meteorológicas, com a finalidade de comparar a ocorrência e as características das ondas de calor entre municípios com diferentes condições sociais, econômicas, demográficas e de infraestrutura. Para representar essa dimensão, foi elaborado um índice composto de vulnerabilidade socioespacial em escala municipal, construído a partir de quatro indicadores: Produto Interno Bruto per capita, Índice de Desenvolvimento Humano Municipal, proporção de domicílios com esgotamento sanitário adequado e densidade populacional.

Inicialmente, todos os indicadores foram padronizados em uma escala comum de 0 a 1 por meio da normalização min-max, permitindo sua comparação e agregação. Na composição do índice, PIB per capita, IDHM e cobertura de esgotamento sanitário foram interpretados como variáveis de proteção social e estrutural; portanto, seus valores foram invertidos, de modo que menores níveis de desenvolvimento econômico, humano e sanitário correspondessem a maior vulnerabilidade. A densidade populacional, por sua vez, foi mantida em sentido direto, por representar maior concentração de pessoas potencialmente expostas aos efeitos do calor extremo.

Após a padronização e o ajuste do sentido dos indicadores, o índice sintético foi calculado pela média simples das quatro variáveis normalizadas. Em seguida, os municípios foram ordenados pelo valor final do índice e agrupados em três classes de vulnerabilidade socioespacial, definidas por tercís: baixa, média e alta vulnerabilidade. A classe atribuída a cada estação meteorológica correspondeu à classificação do município onde a estação está localizada, permitindo estratificar as análises climáticas segundo diferentes contextos territoriais da Região Norte do Brasil.

A partir desse procedimento, as estações de Araguaína-TO, Altamira-PA, Macapá-AP, Manaus-AM, Palmas-TO, Pedro Afonso-TO, Peixe-TO e Porto Nacional-TO foram classificadas como pertencentes a municípios de baixa vulnerabilidade socioespacial. As estações de Belterra-PA, Breves-PA, Conceição do Araguaia-PA, Eirunepé-AM, Itaituba-PA, Porto de Moz-PA, Taguatinga-TO e Tefé-AM compuseram o grupo de média vulnerabilidade. Já Belém-PA, Cametá-PA, Codajás-AM, Lábrea-AM, Monte Alegre-PA, Tarauacá-AC e Tracuateua-PA foram enquadradas na classe de alta vulnerabilidade socioespacial. Essa estratificação foi posteriormente utilizada para comparar as métricas de ocorrência, duração, frequência e intensidade das ondas de calor entre diferentes níveis de vulnerabilidade territorial.

A adoção de um índice composto baseou-se na necessidade de sintetizar múltiplas dimensões territoriais em uma medida integrada e comparável entre municípios, procedimento recorrente em estudos de vulnerabilidade socioambiental e de avaliação de riscos (Nardo et al., 2008). Essa estratégia também se aproxima do Social Vulnerability Index proposto Cutter, Boruff e Shirley (2003), que combina variáveis socioeconômicas e demográficas para representar as diferenças territoriais na vulnerabilidade a riscos ambientais. No campo dos riscos associados ao calor extremo, Reid et al. (2009) mapearam fatores demográficos, condições domiciliares, disponibilidade de ar-condicionado, cobertura vegetal e prevalência de diabetes, enquanto Harlan et al. (2013) relacionaram a mortalidade por calor às condições socioeconômicas, ao ambiente construído e às características biofísicas dos bairros. Esses estudos sustentam a inclusão de renda, infraestrutura urbana, densidade populacional e condições sociais na identificação de territórios mais suscetíveis aos impactos das ondas de calor.

Bases de dados

Foram utilizadas três bases de dados: (i) temperatura máxima diária observada pelas estações convencionais do INMET; (ii) temperatura máxima diária estimada pelo ERA5-Land, extraída no ponto mais próximo de cada estação; e (iii) UTCI do ERA5-HEAT, analisado como UTCImax diário por representar o período de maior exposição térmica. A padronização temporal foi realizada em escala diária e compatível com o horário local. Para as bases do INMET e do ERA5-Land, foram usados dados entre 1995 e 2025, pois é necessário um período climatológico para calcular as ondas de

calor, como mostrado a seguir. E, para o UTCI estimado pelo ERA5-HEAT, foi adotado o período de 2010 a 2025, sendo esse período analisado no presente estudo.

Definição de ondas de calor

As ondas de calor foram identificadas separadamente para o INMET e o ERA5-Land pelo percentil 90 diário da temperatura máxima, calculado para cada estação e fonte de dados, em janela móvel de 15 dias, com duração mínima de três dias consecutivos, calculando um percentil para cada dia do ano para considerar a sazonalidade. Também foi definido um evento percebido pelo UTCI-P90, com base na excedência do percentil 90 local do UTCI_{max}.

Métricas de conforto térmico, severidade e impacto

Foram calculadas métricas de exposição e impacto: número de dias com UTCI ≥ 38 °C, excedência do UTCI-P90 local, UTCI_{max} médio, contraste entre dias com e sem onda de calor, carga térmica acumulada acima de 38 °C e classificação integrada de severidade. O limiar UTCI ≥ 38 °C representa calor muito forte e foi adotado como indicador operacional de estresse térmico severo, uma vez que espera que esses resultados possam colaborar e serem usados em atividades operacionais na região analisada.

Validação, testes estatísticos e análise socioespacial

A avaliação do desempenho do ERA5-Land na identificação de dias de ondas de calor foi realizada por meio de métricas categóricas, tomando os registros observados do INMET como referência. Para essa etapa, cada dia da série foi classificado de forma binária quanto à presença ou ausência de onda de calor em ambas as bases de dados. A partir dessa comparação, foram contabilizados os acertos, falsos alarmes e eventos não detectados, permitindo estimar a capacidade da reanálise em representar os episódios observados.

As métricas utilizadas incluíram a Probabilidade de Detecção (POD), a Razão de Falsos Alarmes (FAR), o Índice Crítico de Sucesso (CSI), o viés categórico (BIAS), o Heidke Skill Score (HSS) e o Equitable Threat Score (ETS). O POD foi empregado para avaliar a proporção de eventos observados pelo INMET corretamente identificados pelo ERA5-Land, enquanto o FAR indicou a fração de eventos estimados pela reanálise que não ocorreram na base observacional. O CSI sintetizou a razão

entre acertos e o total de ocorrências relevantes, considerando acertos, falsos alarmes e falhas de detecção. Já o BIAS permitiu verificar tendência de superestimativa ou subestimativa dos eventos, ao passo que HSS e ETS foram utilizados para mensurar a habilidade da reanálise em relação ao acaso, oferecendo uma avaliação mais robusta da concordância entre as bases.

Para investigar o efeito das ondas de calor sobre o conforto térmico humano, foram comparados os valores de UTCI entre dias com e sem ocorrência de ondas de calor. Como as distribuições de UTCI não necessariamente seguem normalidade e podem apresentar assimetria, optou-se pelo uso de testes não paramétricos. O teste de Wilcoxon/Mann-Whitney foi aplicado para avaliar diferenças nas medianas entre os grupos, enquanto o teste de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para verificar diferenças na forma geral das distribuições. Essa combinação permitiu identificar não apenas alterações nos valores centrais do UTCI, mas também mudanças na distribuição completa do estresse térmico humano associadas aos episódios de calor extremo.

As tendências temporais das métricas anuais foram avaliadas pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall, adequado para identificar tendências monotônicas em séries climáticas, e pela inclinação de Sen, utilizada para estimar a magnitude da tendência ao longo do tempo. Por fim, foi construído um índice de prioridade socioespacial com o objetivo de sintetizar a exposição ao calor percebido e a vulnerabilidade territorial. Esse índice combinou três dimensões principais: a exposição média a dias com $UTCI \geq 38^\circ\text{C}$, o aumento da probabilidade de ocorrência dessa condição durante ondas de calor e a classe de vulnerabilidade socioespacial dos municípios. A integração dessas dimensões permitiu identificar áreas prioritárias para ações de monitoramento, adaptação e planejamento voltadas à redução dos riscos associados ao estresse térmico severo na Região Norte do Brasil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desempenho do ERA5-Land na detecção de ondas de calor e implicações para o UTCI

A Tabela 1 apresenta as métricas categóricas de desempenho do ERA5-Land na detecção de dias de ondas de calor em relação aos registros observados pelo INMET, considerando as três classes de vulnerabilidade socioespacial. De forma geral, os resultados indicam uma habilidade moderada da reanálise para representar os eventos observados, com acurácia elevada em todas as classes, variando entre 0,92 e

0,93. Contudo, a acurácia deve ser interpretada com cautela, pois a maior frequência de dias sem onda de calor pode inflar esse indicador. Por esse motivo, métricas como POD, FAR, CSI, HSS e ETS são mais adequadas para avaliar a capacidade real de detecção de eventos extremos. O POD variou de 0,41 na classe de alta vulnerabilidade a 0,50 na classe média, indicando que o ERA5-Land identificou entre 41% e 50% dos dias de onda de calor observados pelo INMET.

Tabela 1 - Médias das métricas categóricas de detecção de ondas de calor do ERA5-Land em relação ao INMET, por classe de vulnerabilidade.

Vulnerabilidade	POD	FAR	CSI	BIAS	ACC	HSS	ETS	POD impacto UTCI-P90	FAR impacto UTCI-P90
Alta	0,41	0,64	0,22	1,31	0,93	0,33	0,20	0,61	0,57
Baixa	0,49	0,57	0,30	1,13	0,93	0,42	0,27	0,64	0,55
Média	0,50	0,60	0,28	1,34	0,92	0,40	0,25	0,70	0,53

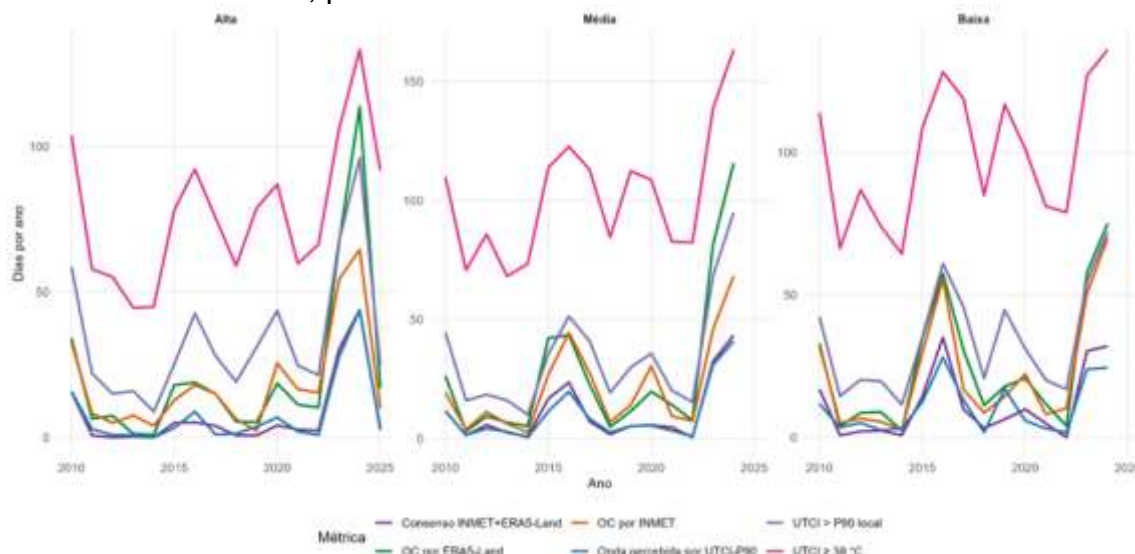
O melhor desempenho geral foi observado na classe de baixa vulnerabilidade socioespacial. Embora o POD dessa classe tenha sido de 0,49, valor próximo ao da classe média, ela apresentou menor BIAS, menor FAR e os maiores valores de CSI, HSS e ETS. O BIAS de 1,13 indica uma leve tendência de superestimativa dos dias de onda de calor, menos acentuada do que nas classes média e alta, cujos valores foram de 1,34 e 1,31, respectivamente. Além disso, o CSI de 0,30, o HSS de 0,42 e o ETS de 0,27 indicam maior concordância entre ERA5-Land e INMET nesse grupo de estações. Por outro lado, a classe de alta vulnerabilidade apresentou o desempenho mais limitado, com menor POD, maior FAR e menores valores de CSI, HSS e ETS, sugerindo maior incerteza na representação dos eventos em municípios social e territorialmente mais vulneráveis.

Os indicadores relacionados ao impacto sobre o UTCI-P90 mostram que, mesmo com limitações na detecção meteorológica de ondas de calor, parte dos eventos identificados pelo ERA5-Land coincide com dias de maior estresse térmico humano. O POD de impacto UTCI-P90 variou de 0,61 na classe de alta vulnerabilidade a 0,70 na classe média, indicando que a reanálise capturou uma proporção relevante dos dias associados à superação do percentil 90 do UTCI. Entretanto, os valores de FAR de impacto UTCI-P90, entre 0,53 e 0,57, indicam que ainda há uma ocorrência expressiva de falsos alarmes. Assim, os resultados reforçam que o ERA5-Land é útil para análises regionais e comparativas sobre ondas de calor na Região Norte do Brasil, mas seu uso

em aplicações locais, especialmente em estudos de risco, conforto térmico e saúde pública, deve ser acompanhado de validação observacional e de interpretação cautelosa.

A Figura 1 mostra que os dias anuais associados ao estresse térmico severo, representados por $UTCI \geq 38^\circ\text{C}$, são mais frequentes do que os dias classificados como ondas de calor meteorológicas pelo INMET, pelo ERA5-Land ou pelo consenso entre as duas bases de dados. Esse comportamento se observa nas três classes de vulnerabilidade, o que indica que a população pode estar exposta a condições de calor percebido severo mesmo em anos com menor número de ondas de calor. Observa-se também forte variabilidade interanual, com períodos de redução entre 2011 e 2014 e de aumento expressivo a partir de 2023, especialmente em 2024. Esse comportamento reforça que o UTCI capta uma dimensão mais próxima da experiência humana do calor, pois incorpora não apenas a temperatura do ar, mas também os efeitos combinados de umidade, vento e radiação.

Figura 1 - Comparação anual entre dias de onda de calor e métricas de estresse térmico humano severo, por classe de vulnerabilidade.

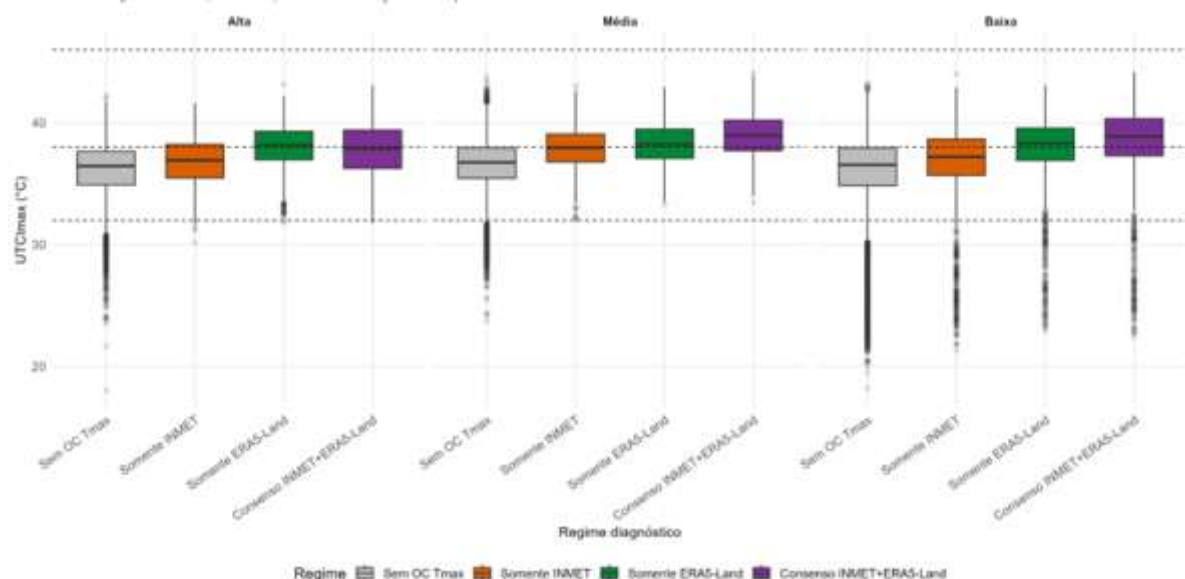


Analisando as classes de vulnerabilidade, a classe média apresenta os maiores valores anuais de $UTCI \geq 38^\circ\text{C}$ no final da série de dados, enquanto as classes alta e baixa também mostram uma intensificação significativa nos anos mais recentes. As métricas baseadas em ondas de calor apresentam comportamento mais irregular, com picos marcantes em 2016 e, principalmente, em 2024, quando há aumento simultâneo das ocorrências pelo INMET, pelo ERA5-Land, pelo consenso e pela onda percebida

pelo UTCI-P90. A distância entre a linha do UTCI ≥ 38 °C e as demais métricas indica que o estresse térmico severo é uma condição recorrente na Região Norte, não restrita apenas aos eventos formalmente classificados como ondas de calor.

A Figura 2 indica que os dias classificados como ondas de calor apresentam valores de UTCImax superiores aos dos dias sem ocorrência de OC Tmax, independentemente da classe de vulnerabilidade socioespacial. Esse aumento é mais evidente nos regimes. Somente ERA5-Land e, principalmente, Consenso INMET+ERA5-Land, nos quais as medianas se aproximam ou ultrapassam o limiar de 38 °C, associado ao estresse térmico severo. Isso indica que, quando as bases meteorológicas detectam eventos de calor, há também uma intensificação do calor percebido pela população.

Figura 2 - Distribuição do UTCImax nos regimes de concordância e de divergência entre INMET e ERA5-Land. Linhas tracejadas de UTCI em 32,38, 46°C.



Entre as classes, a vulnerabilidade média apresenta os maiores valores centrais de UTCImax, seguida pelas classes baixa e alta, respectivamente, sugerindo que o risco biometeorológico não depende apenas da vulnerabilidade social, mas também das condições climáticas locais. A presença de muitos valores abaixo dos limiares nos dias sem OC Tmax indica maior variabilidade térmica fora dos eventos extremos. Em síntese, a análise reforça que a concordância entre INMET e ERA5-Land identifica episódios mais críticos de calor percebido, úteis para avaliar risco térmico humano na Região Norte.

Contraste do UTCI entre dias com e sem ondas de calor

A Tabela 2 mostra que, independentemente da definição adotada, os dias com ondas de calor apresentam UTCI médio superior aos dias sem evento, confirmando que as ondas de calor estão associadas à intensificação do estresse térmico humano na Região Norte do Brasil. As ondas identificadas pelo ERA5-Land apresentaram aumentos médios de UTCI entre 1,73 °C e 2,00 °C, com maior incremento na classe de baixa vulnerabilidade. Já as ondas detectadas pelo INMET também elevaram o UTCI, porém com menor magnitude na classe de alta vulnerabilidade, na qual o aumento foi de 0,93 °C. Esse resultado indica que as diferentes bases climáticas captam episódios de calor com impactos biometeorológicos distintos, sendo o ERA5-Land mais sensível à identificação de eventos associados à maior intensificação do calor percebido.

Tabela 2 - Contraste do UTCI_{max} entre dias com e sem ondas de calor por classe de vulnerabilidade.

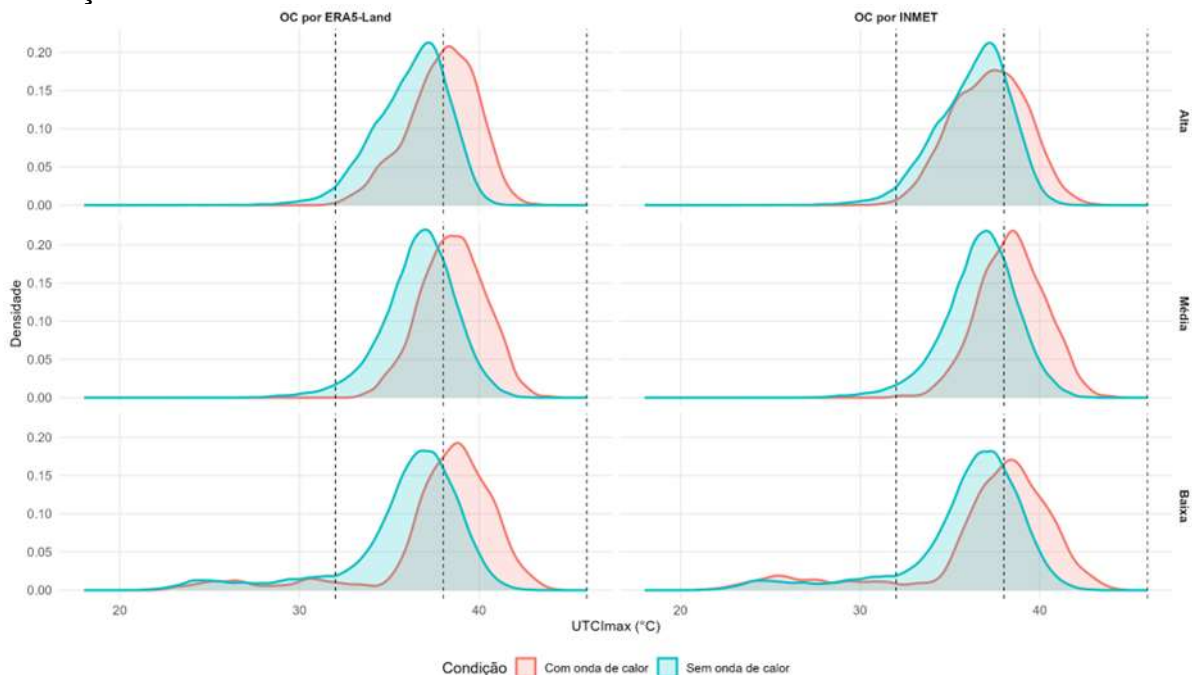
Definição de OC	Vulnerabilidade	n com OC	n sem OC	UTCI médio com OC	UTCI médio sem OC	Δ UTCI	P(UTCI $\geq$ 38 OC) %	P(UTCI $\geq$ 38 sem OC) %	Δ P38 p.p.	P(UTCI $\geq$ P90 OC) %	Δ P90 p.p.
OC por ERA5-Land	Alta	2419	37759	37,94	36,21	1,73	52,5	19,0	33,5	36,0	28,4
OC por ERA5-Land	Média	2896	35457	38,55	36,64	1,91	61,9	25,2	36,7	43,0	36,3
OC por ERA5-Land	Baixa	3027	40805	37,80	35,80	2,00	60,5	24,7	35,8	40,2	33,2
OC por INMET	Alta	2069	38109	37,20	36,27	0,93	37,2	20,2	17,0	27,6	19,3
OC por INMET	Média	2267	36086	38,44	36,68	1,76	60,0	25,9	34,1	35,9	28,1
OC por INMET	Baixa	2707	41125	37,06	35,87	1,19	51,3	25,6	25,8	30,9	23,0
Onda percebida por UTCI-P90	Alta	855	39323	39,08	36,25	2,83	78,1	19,8	58,3	100,0	92,6
Onda percebida por UTCI-P90	Média	1044	37309	39,63	36,71	2,92	87,0	26,3	60,7	100,0	93,1
Onda percebida por UTCI-P90	Baixa	1264	42568	38,54	35,86	2,68	77,6	25,7	52,0	100,0	93,4

As probabilidades de ocorrência de UTCI $\geq$ 38 °C aumentam substancialmente nos dias com ondas de calor, sobretudo quando a definição se baseia no ERA5-Land ou na onda percebida pelo UTCI-P90. Para as ondas observadas pelo ERA5-Land, a probabilidade de estresse térmico severo durante os eventos variou de 52,5% na classe de alta vulnerabilidade a 61,9% na classe média, enquanto, nos dias sem ondas, esses valores ficaram entre 19,0% e 25,2%. No caso das ondas do INMET, o aumento também foi evidente, mas menos intenso na classe

de alta vulnerabilidade. A classe média se destaca novamente, com 60,0% de probabilidade de $UTCI \geq 38^\circ\text{C}$ durante ondas por INMET, indicando que os eventos nessa classe combinam maior intensidade térmica e maior persistência de condições severas de conforto humano.

A Figura 3 mostra que, em todas as classes de vulnerabilidade socioespacial, os dias com ondas de calor apresentam deslocamento da distribuição do $UTCI_{\text{max}}$ para valores mais elevados em comparação aos dias sem ondas de calor. Esse comportamento é observado tanto quando as ondas são definidas pelo ERA5-Land quanto pelo INMET, indicando que os eventos meteorológicos de calor extremo estão associados ao aumento do estresse térmico humano. As curvas dos dias com onda de calor concentram-se com maior frequência próximas ou acima de 38°C , limiar associado ao estresse térmico severo, enquanto os dias sem evento apresentam maior concentração em valores ligeiramente inferiores.

Figura 3 - Distribuição do $UTCI_{\text{max}}$ em dias com e sem ondas de calor, para definições baseadas no INMET e no ERA5-Land.

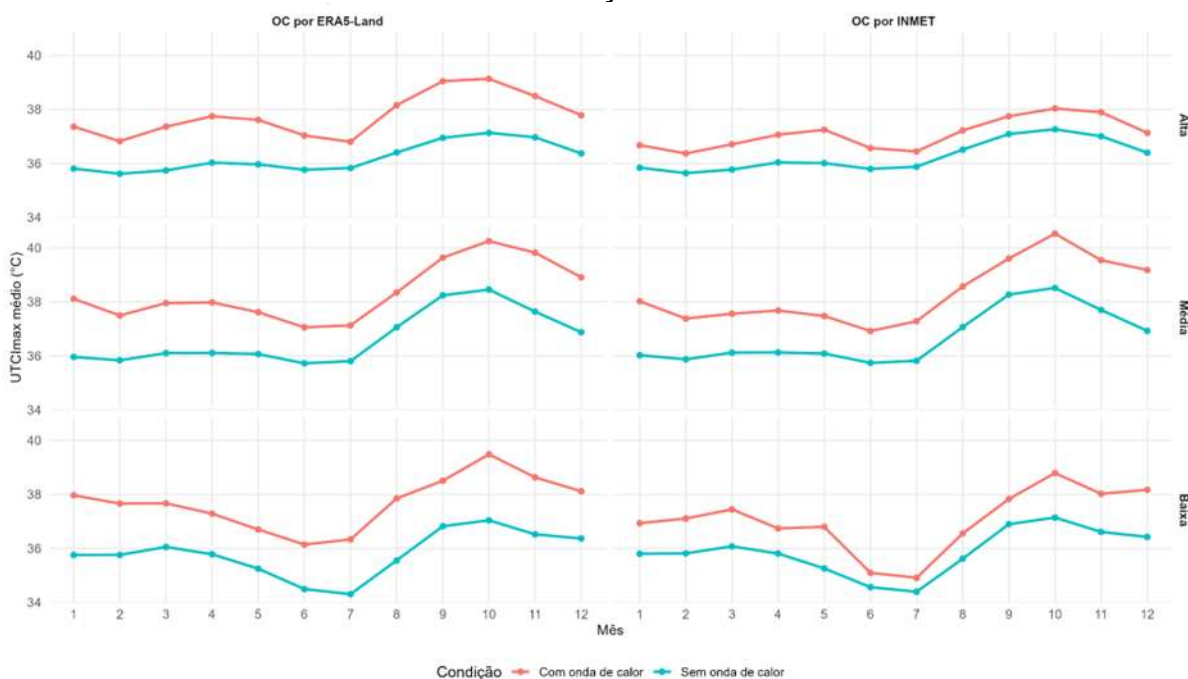


A diferença entre as curvas é mais nítida nas ondas identificadas pelo ERA5-Land, especialmente nas classes média e baixa, nas quais o deslocamento para a direita indica maior intensificação do $UTCI_{\text{max}}$ durante os eventos. No caso das ondas detectadas pelo INMET, o padrão também se observa, embora com sobreposição um

pouco maior entre os dias com e sem onda de calor, sobretudo na classe de alta vulnerabilidade. Essa sobreposição sugere que parte da população já convive com condições frequentes de estresse térmico mesmo fora dos episódios formalmente classificados como ondas de calor.

A Figura 4 mostra que o UTCI_{max} médio é maior nos dias com ondas de calor em todos os meses, classes de vulnerabilidade e definições utilizadas. A diferença entre dias com e sem evento é mais evidente entre agosto e novembro, período em que o calor percebido se intensifica na Região Norte. Esse padrão indica que as ondas de calor elevam sistematicamente o estresse térmico humano, especialmente no período menos chuvoso.

Figura 4 - Climatologia mensal do UTCI_{max} em dias com e sem ondas de calor, por classe de vulnerabilidade e fonte de detecção.

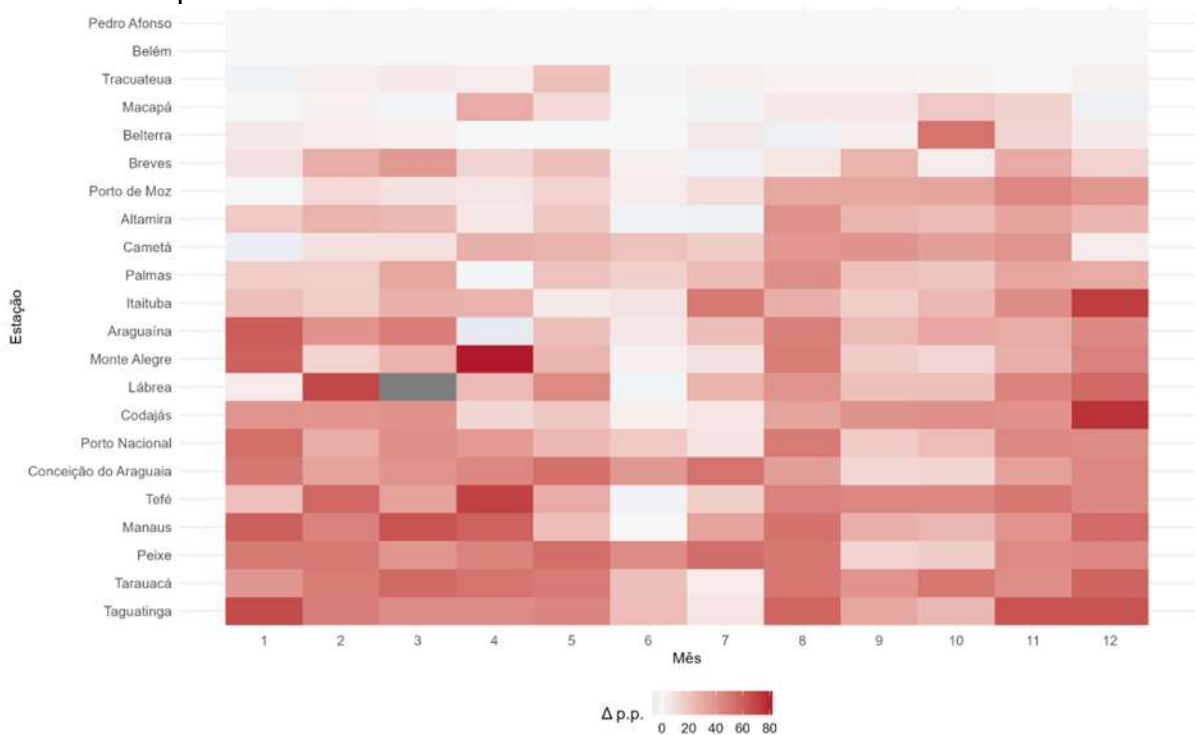


As classes média e baixa apresentam os maiores valores mensais de UTCI_{max} durante ondas de calor, com picos próximos ou superiores a 40 °C, sobretudo em setembro e outubro. A definição baseada no ERA5-Land tende a produzir contrastes mais fortes entre dias com e sem onda de calor, enquanto a do INMET mostra comportamento semelhante, mas com diferenças menores. Em

conjunto, os resultados reforçam a ideia de que a sazonalidade amazônica intensifica o risco biometeorológico durante episódios de calor extremo.

A Figura 5 mostra o aumento da probabilidade de ocorrência de UTCI $\geq 38^{\circ}\text{C}$ durante ondas de calor identificadas pelo INMET, em comparação com os dias sem onda de calor, por estação e por mês. De modo geral, os maiores acréscimos concentram-se nas estações do interior da Região Norte, especialmente em Taguatinga, Tarauacá, Peixe, Manaus, Tefé, Conceição do Araguaia, Porto Nacional, Lábrea e Monte Alegre. Nesses locais, os tons de vermelho mais intensos indicam que a presença de ondas de calor eleva significativamente a probabilidade de estresse térmico severo em alguns meses, com aumentos superiores a 60 pontos percentuais.

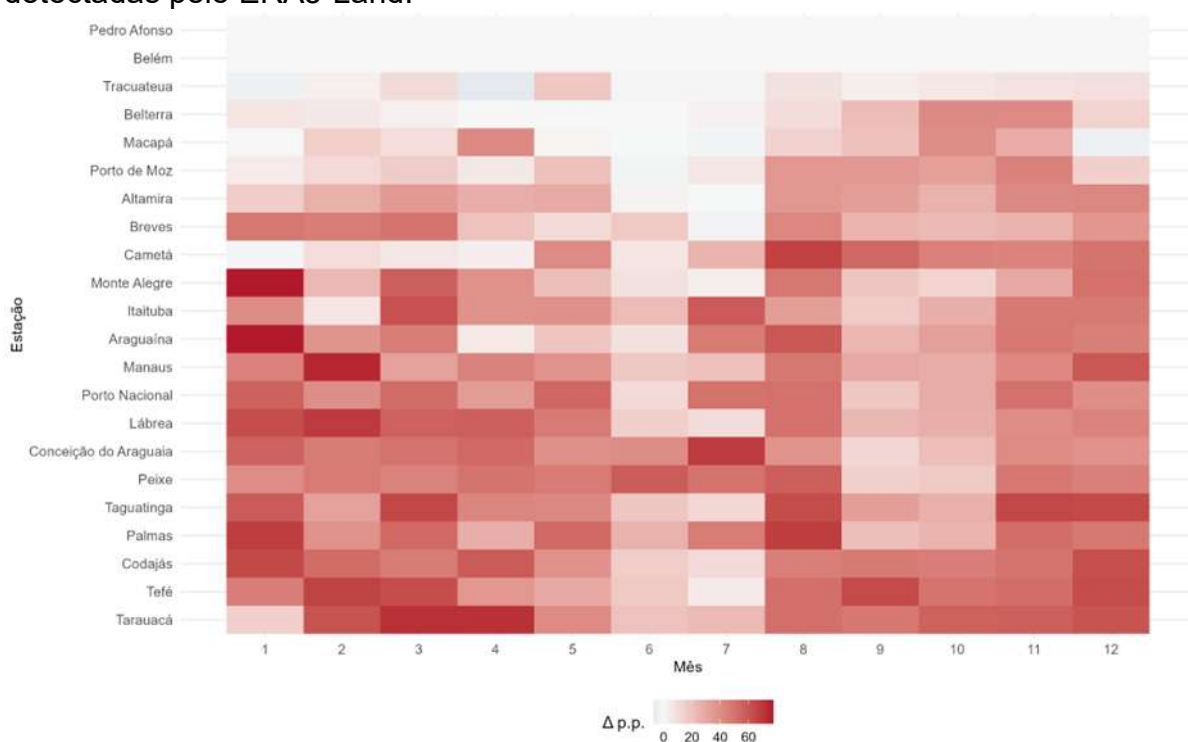
Figura 5 - Aumento mensal da probabilidade de UTCI $\geq 38^{\circ}\text{C}$ durante ondas de calor observadas pelo INMET



O padrão mensal também evidencia maior intensificação entre janeiro e abril e, principalmente, entre agosto e dezembro, período que coincide com a fase menos chuvosa em grande parte da Amazônia e do Tocantins. Por outro lado, algumas estações, como Pedro Afonso, Belém e Tracuateua, apresentam aumentos mais fracos ou irregulares, sugerindo menor contraste entre dias com e sem onda de calor ou menor frequência de eventos no período analisado.

A Figura 6 apresenta o aumento da probabilidade de ocorrência de $UTCI \geq 38^{\circ}\text{C}$ durante ondas de calor detectadas pelo ERA5-Land, em comparação com os dias sem onda de calor. Observa-se que os maiores acréscimos ocorrem em estações do interior da Região Norte, como Araguaína, Monte Alegre, Manaus, Porto Nacional, Conceição do Araguaia, Palmas, Codajás, Tefé, Taguatinga e Tarauacá. Nessas localidades, os tons mais intensos indicam que a presença de ondas de calor estimadas pela reanálise está fortemente associada a um aumento da probabilidade de estresse térmico severo.

Figura 6 - Aumento mensal da probabilidade de $UTCI \geq 38^{\circ}\text{C}$ durante ondas de calor detectadas pelo ERA5-Land.



O padrão mensal mostra uma intensificação mais ampla entre agosto e dezembro, mas também há aumentos expressivos entre janeiro e abril em várias estações. Em comparação com a detecção do INMET, o ERA5-Land apresenta uma distribuição espacial mais contínua dos aumentos de probabilidade, sugerindo maior sensibilidade da reanálise para identificar condições favoráveis ao calor percebido severo. Por outro lado, estações como Pedro Afonso, Belém e Tracuateua apresentam valores mais baixos ou irregulares, indicando menor contraste entre dias com e sem onda de calor.

A semelhança geral entre INMET e ERA5-Land sugere que a reanálise captura a estrutura regional do agravamento térmico; contudo, diferenças de

magnitude indicam que a duração e a extensão espacial dos eventos podem ser ampliadas em relação às observações pontuais.

Categorias UTCI, severidade integrada e eventos críticos

A classificação por categorias de UTCI mostra que os eventos deslocam a exposição ao calor forte para o calor muito forte, sobretudo nos regimes de consenso e nos eventos percebidos por UTCI-P90. A severidade integrada indica que a duração meteorológica isolada não explica todo o risco: eventos com durações semelhantes podem produzir cargas térmicas muito diferentes, dependendo do nível de UTCI atingido.

A tabela apresenta os eventos mais severos de ondas de calor segundo a carga térmica acumulada acima de 38 °C, evidenciando episódios críticos concentrados principalmente entre agosto, setembro e outubro de 2023 e 2024. Os maiores impactos ocorreram nas estações de Tefé-AM, Codajás-AM e Manaus-AM, onde os eventos apresentaram longa duração, elevados valores de UTCI_{max} e UTCI médio próximo ou acima de 38 °C. O caso mais extremo foi registrado em Tefé-AM, entre 14 de setembro e 15 de outubro de 2023, com duração de 32 dias, UTCI_{max} de 44,17 °C, UTCI médio de 38,94 °C e maior carga térmica acumulada acima de 38 °C. Esse padrão indica exposição prolongada a condições de estresse térmico severo, com potencial agravamento dos riscos à saúde humana.

Observa-se que a maior parte dos eventos críticos foi identificada pelo ERA5-Land, especialmente nas estações do Amazonas, como Tefé, Codajás e Manaus. Isso sugere que a reanálise captou episódios persistentes e intensos de calor percebido, sobretudo no interior amazônico. Entretanto, os eventos detectados pelo INMET também apresentaram elevada severidade, como em Porto de Moz-PA, Tracuateua-PA e Araguaína-TO, o que indica que os registros observacionais confirmam a ocorrência de episódios de forte impacto biometeorológico. A presença de estações classificadas em diferentes níveis de vulnerabilidade entre os eventos críticos demonstra que o risco não se limita a uma única classe socioespacial, embora áreas de média e alta vulnerabilidade apareçam com frequência entre os episódios de maior carga térmica.

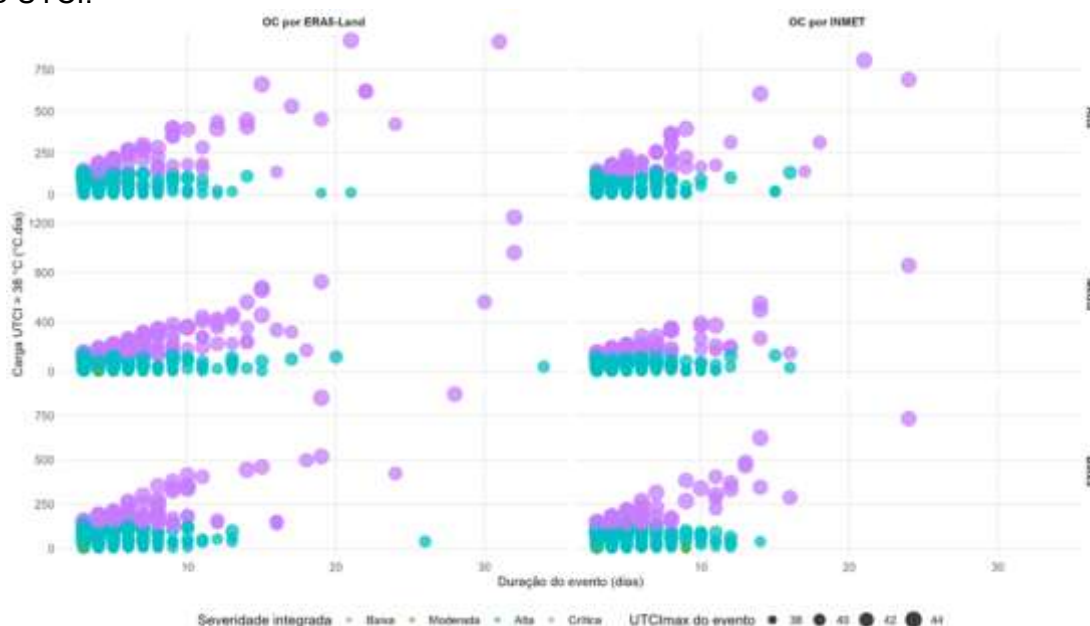
A Figura 7 evidencia que a carga térmica severa aumenta com a duração dos eventos, embora não de forma linear. Assim, a duração deve ser interpretada em conjunto com a intensidade do UTCI, pois eventos curtos podem produzir alta carga

térmica quando ocorrem sob calor percebido muito elevado. E essa carga pode desencadear vários problemas para ecossistemas, atividades humanas e infraestrutura.

Tabela 4 - Eventos com maior carga térmica severa acumulada acima de 38 °C

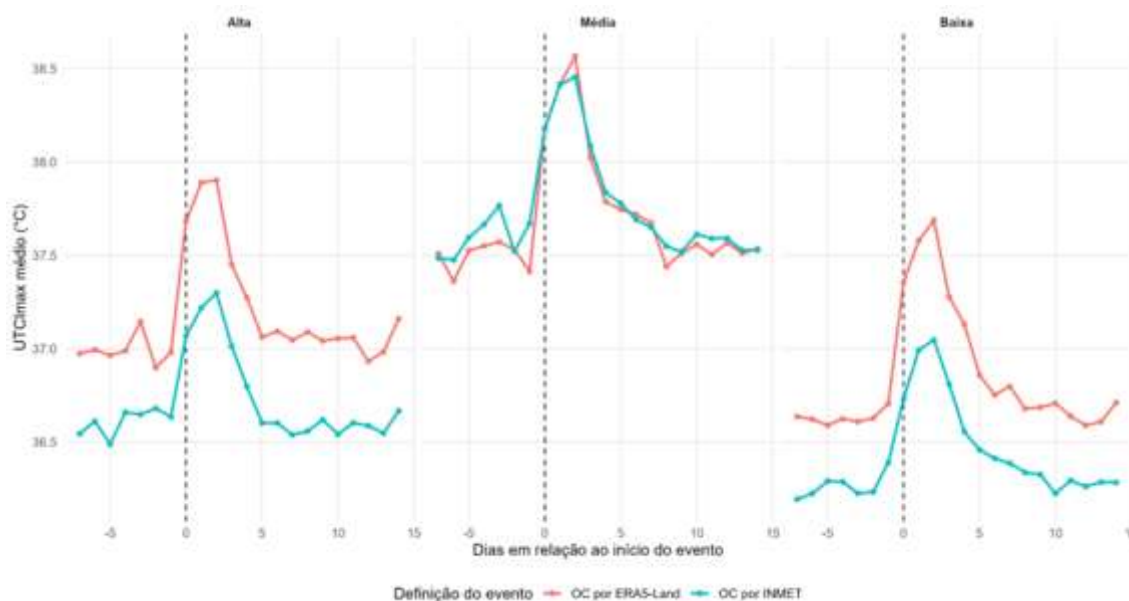
Fonte	Estação	UF	Vulnerabilidade	Início	Fim	Duração	UTCI _{max}	UTCI médio	Dias UTCI ≥ 38	Carga UTCI > 38	Severidade
OC por ERA5-Land	Tefé	AM	Média	2023-09-14	2023-10-15	32	44,17	38,94	551	1247,5	Crítica
OC por ERA5-Land	Tefé	AM	Média	2024-08-27	2024-09-27	32	43,29	38,41	515	961,9	Crítica
OC por ERA5-Land	Codajás	AM	Alta	2023-09-25	2023-10-15	21	44,17	39,20	371	926,0	Crítica
OC por ERA5-Land	Codajás	AM	Alta	2024-08-27	2024-09-26	31	43,29	38,39	497	917,7	Crítica
OC por ERA5-Land	Manaus	AM	Baixa	2024-08-30	2024-09-26	28	43,29	38,50	463	871,2	Crítica
OC por INMET	Porto de Moz	PA	Média	2024-09-08	2024-10-01	24	43,29	38,71	400	858,6	Crítica
OC por ERA5-Land	Manaus	AM	Baixa	2023-09-26	2023-10-14	19	44,17	39,22	335	850,5	Crítica
OC por INMET	Tracuateua	PA	Alta	2023-09-17	2023-10-07	21	43,94	38,88	356	806,2	Crítica
OC por INMET	Araguaína	TO	Baixa	2024-08-31	2024-09-23	24	43,29	38,48	398	733,2	Crítica
OC por ERA5-Land	Porto de Moz	PA	Média	2024-09-12	2024-09-30	19	43,29	38,82	317	726,2	Crítica
OC por INMET	Tracuateua	PA	Alta	2024-08-30	2024-09-22	24	43,27	38,38	392	689,8	Crítica
OC por ERA5-Land	Itaituba	PA	Média	2023-09-30	2023-10-14	15	44,17	39,23	265	673,9	Crítica

Figura 7 - Relação entre a duração das ondas de calor e a carga térmica severa percebida pelo UTCI.



A Figura 8 mostra um aumento do UTCImax nos dias que antecedem o início das ondas de calor, um pico próximo ao início do evento e um declínio posterior. Esse padrão reforça que os eventos de calor não são isolados, mas fazem parte de sequências térmicas persistentes que acumulam carga fisiológica.

Figura 8 - Composto do UTCImax ao redor do início das ondas de calor.



Risco relativo, tendências decadais e prioridade socioespacial

A Tabela 5 mostra que a onda de calor meteorológica aumenta substancialmente o risco de UTCI > P90 local e de UTCI $\geq$ 38 °C. O risco relativo é mais alto para UTCI-P90, enquanto a diferença absoluta de probabilidade é mais informativa para locais que já apresentam exposição crônica ao calor severo.

Tabela 5 - Razão de risco e diferença absoluta de probabilidade para UTCI $\geq$ 38 °C e UTCI > P90 local durante ondas de calor.

Desfecho	Fonte de OC	RR médio	RR mediano	Δ p.p. médio	P(desfecho OC) %	P(desfecho sem OC) %
UTCI > P90 local	OC por ERA5-Land	5,83	5,87	31,6	38,7	7,1
UTCI > P90 local	OC por INMET	4,14	4,03	23,7	31,7	8,0
UTCI > P90 local	Onda percebida por UTCI-P90	14,64	14,34	93,0	100,0	7,0
UTCI $\geq$ 38 °C	OC por ERA5-Land	3,93	2,45	33,4	56,3	23,0
UTCI $\geq$ 38 °C	OC por INMET	3,11	2,11	26,6	50,5	23,8
UTCI $\geq$ 38 °C	Onda percebida por UTCI-P90	8,15	3,31	54,9	78,8	23,9

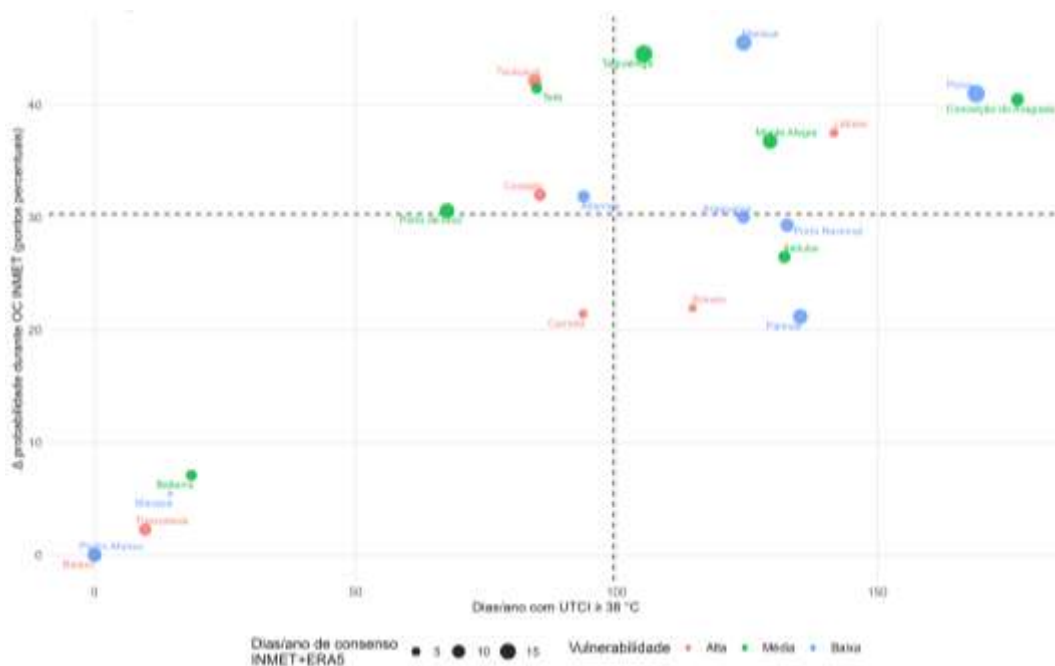
A Tabela 6 indica uma tendência média positiva para a maioria das métricas, especialmente para indicadores baseados em UTCI. Embora nem todas as séries apresentem significância estatística em cada estação, a direção predominante das tendências reforça o sinal de intensificação recente do calor percebido.

Tabela 6 - Síntese das tendências anuais por Mann-Kendall e inclinação de Sen.

Métrica	Nº estações	Nº tendências significativas	Sen médio/ano	Sen mediano/ano
carga_utci38	23	1	3,024	3,308
carga_utci_p90	23	0	0,749	0,742
dias_hw_consenso	23	1	0,263	0,129
dias_hw_era5land	23	4	1,062	1,000
dias_hw_inmet	23	5	0,853	0,812
dias_hw_utci_p90	23	1	0,247	0,071
dias_utci38	23	2	2,169	2,290
dias_utci_p90	23	1	1,402	1,375
utci_media	23	2	0,030	0,031
utci_p95	23	1	0,039	0,040

A matriz (Figura 9) organiza as estações por exposição anual ao UTCI ≥ 38 °C e pelo aumento dessa probabilidade durante as ondas de calor. O quadrante superior direito identifica locais com exposição crônica elevada e forte agravamento durante eventos, enquanto os demais quadrantes indicam prioridades específicas de monitoramento.

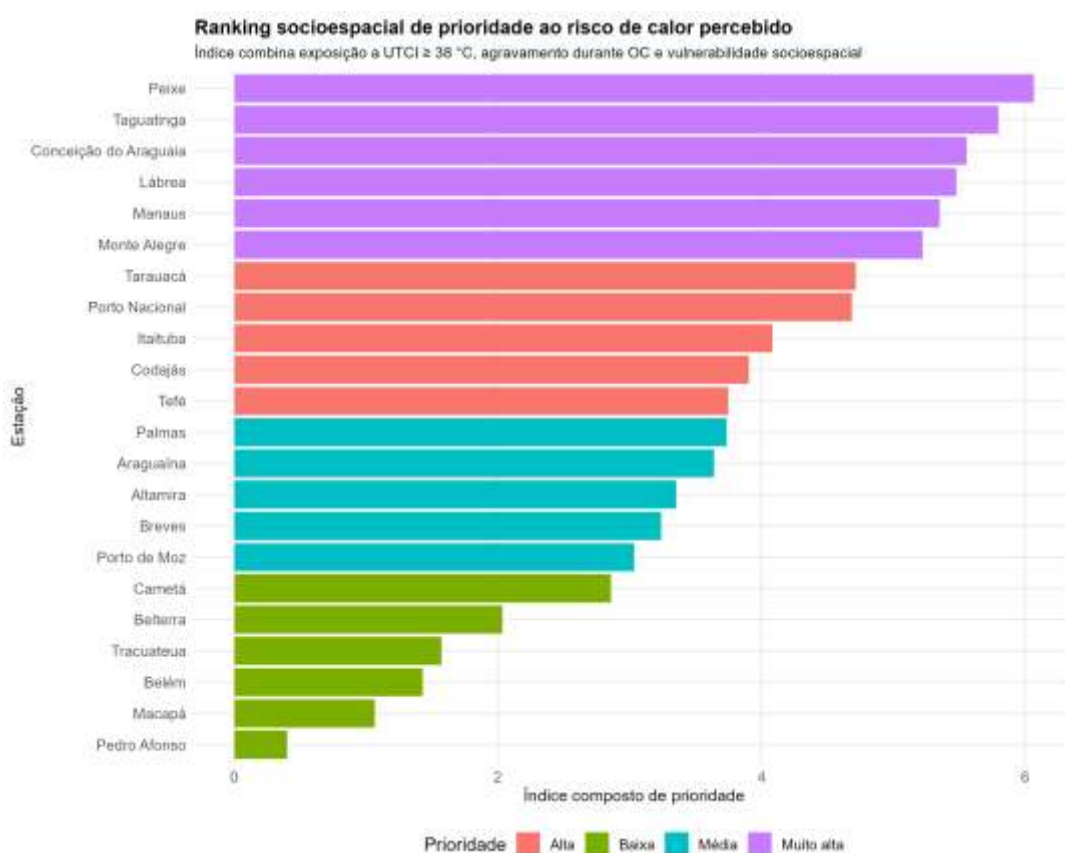
Figura 9 - Matriz socioespacial de prioridade para risco de calor percebido severo.



A Figura 10 sintetiza a prioridade socioespacial. Peixe, Taguatinga, Conceição do Araguaia, Lábrea, Manaus e Monte Alegre compõem o grupo de prioridade muito alta, caracterizado por exposição ao UTCI ≥ 38 °C, intensificação durante ondas de calor e vulnerabilidade socioespacial.

O ranking não deve ser interpretado como diagnóstico epidemiológico direto, mas sim como instrumento de triagem para orientar o monitoramento, os estudos de saúde e as ações locais de adaptação ao calor.

Figura 10 - Ranking socioespacial de prioridade ao risco de calor percebido severo.



Síntese interpretativa dos resultados

Os resultados indicam que o risco térmico na Região Norte decorre da combinação entre a exposição crônica ao calor muito intenso e a intensificação durante as ondas de calor. A temperatura máxima identifica o perigo meteorológico, enquanto o UTCI traduz melhor a carga fisiológica percebida pela população.

Os achados dialogam com a literatura sobre intensificação das ondas de calor, aumento do calor percebido no Brasil e vulnerabilidade de populações expostas a

calor úmido (Perkins-Kirkpatrick e Lewis, 2020; Ballarin et al., 2024; Neves et al., 2025; Zhou et al., 2025). Na Amazônia, a associação entre calor, seca, queimadas e desigualdade socioespacial amplia a necessidade de sistemas de alerta e de planejamento intersetorial.

A comparação entre INMET e ERA5-Land mostra que a reanálise é útil para estudos regionais, mas não substitui a observação. O ERA5-Land apresenta desempenho moderado na detecção de OC, com maior capacidade quando os eventos estão associados ao UTCI-P90. Isso sugere que parte dos eventos captados pela reanálise tem relevância fisiológica, mesmo quando há divergência categórica em relação ao INMET. Portanto, em aplicações de saúde pública, falsos alarmes meteorológicos podem ser reavaliados sob a ótica do UTCI: se coincidirem com o calor percebido, talvez não sejam falsos alarmes do ponto de vista do impacto humano.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou o impacto das ondas de calor sobre o estresse térmico humano severo na Região Norte do Brasil, integrando dados do INMET, do ERA5-Land e do UTCI/ERA5-HEAT. A principal conclusão é que as ondas de calor intensificam uma exposição térmica de base já elevada, deslocando o UTCI_{max} para categorias de maior risco fisiológico.

O ERA5-Land apresentou desempenho moderado na detecção de ondas de calor e maior utilidade para análises regionais do que para decisões locais sem validação. Já o UTCI mostrou-se essencial para qualificar o impacto humano dos eventos, pois incorpora umidade, vento e radiação.

A prioridade muito alta observada em Peixe, Taguatinga, Conceição do Araguaia, Lábrea, Manaus e Monte Alegre indica que as estratégias de adaptação ao calor devem considerar simultaneamente a exposição, a severidade do evento e a vulnerabilidade socioespacial.

Recomenda-se que estudos futuros integrem estes resultados a dados epidemiológicos, de qualidade do ar, de fumaça de queimadas, de urbanização, de cobertura vegetal e de acesso a serviços de saúde, permitindo estimativas diretas de risco e suporte a sistemas locais de alerta de calor.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. A. C. D. S. D. et al. Influence of extreme heat waves as an aggravating factor in the cause of death from cardiovascular diseases in Southeast Brazil. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 42, e00088725, 2026.
- ARSAD, F. S. et al. The impact of heatwaves on mortality and morbidity and the associated vulnerability factors: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022.
- BALLARIN, A. S. et al. Escalating threat of human-perceived heatwaves in Brazil. *Environmental Research Communications*, v. 6, 111004, 2024.
- BITENCOURT, D. P. et al. Frequência, duração, abrangência espacial e intensidade das ondas de calor no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2016.
- BITENCOURT, D. P. et al. Heat waves in Brazil: climatology and trends. *International Journal of Climatology*, 2020.
- BLAUSTEIN, J. R. et al. Environmental impacts on cardiovascular health and biology: an overview. *Circulation Research*, v. 134, p. 1048-1060, 2024.
- BRÖDE, P. et al. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, v. 56, p. 481-494, 2012.
- BUTT, E. W. et al. Amazon deforestation causes strong regional warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 120, n. 45, e2309123120, 2023.
- CAMPBELL, S. et al. Heatwave and health impact research: a global review. *Health & Place*, v. 53, p. 210-218, 2018.
- CHEN, H. et al. Regional variations in the impacts of high temperature on hospital admissions in Brazil. *Environment International*, v. 202, 109620, 2025.
- CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003.
- DI NAPOLI, C.; PAPPENBERGER, F.; CLOKE, H. L. Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index. *International Journal of Biometeorology*, 2020.
- DI NAPOLI, C. et al. ERA5-HEAT: a global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis. *Scientific Data*, 2021.
- DOMEISEN, D. I. V. et al. Prediction and projection of heatwaves. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023.

FERREIRA, V. et al. Evaluating the 2023-2024 record dry-hot conditions in the Amazon in the context of historical compound extremes. *Environmental Research Letters*, v. 20, 084055, 2025.

FIALA, D. et al. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, v. 56, p. 429-441, 2012.

HAJAT, S.; KOSATKY, T. Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity. *Journal of Epidemiology and Community Health*, v. 64, p. 753-760, 2010.

HARLAN, S. L. et al. Neighborhood effects on heat deaths: social and environmental predictors of vulnerability in Maricopa County, Arizona. *Environmental Health Perspectives*, v. 121, n. 2, p. 197-204, 2013.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, p. 1999-2049, 2020.

HUSSAIN, M. M.; MAHMUD, I. pyMannKendall: a Python package for non-parametric Mann-Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, v. 4, 1556, 2019.

JAY, O. et al. Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities. *The Lancet*, v. 398, p. 709-724, 2021.

JENDRITZKY, G.; DE DEAR, R.; HAVENITH, G. UTCI - why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, v. 56, p. 421-428, 2012.

LIBONATI, R. et al. Extreme droughts and heatwaves in the Amazon and implications for fire and health risks. *Scientific Reports*, 2022.

MANDÚ, T. B. et al. Impacto das ondas de calor no conforto térmico humano na região da Floresta Nacional do Tapajós, Oeste do Pará. *Biodiversidade Brasileira*, 2021.

MEEHL, G. A.; TEBALDI, C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, v. 305, p. 994-997, 2004.

MUÑOZ-SABATER, J. et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, v. 13, p. 4349-4383, 2021.

NARDO, M. et al. Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide. Paris: OECD Publishing, 2008.

NEVES, J. A. et al. Too hot to ignore: the escalating health impact of heatwaves in Brazil. 2025.

PERKINS, S. E.; ALEXANDER, L. V.; NAIRN, J. R. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophysical Research Letters*, v. 39, L20714, 2012.

PERKINS, S. E.; ALEXANDER, L. V. On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, v. 26, p. 4500-4517, 2013.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; LEWIS, S. C. Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, v. 11, 3357, 2020.

REID, C. E. et al. Mapping community determinants of heat vulnerability. *Environmental Health Perspectives*, v. 117, n. 11, p. 1730-1736, 2009.

SAPARI, N. et al. Heat stress and human health under climate change. *Environmental Research*, 2024.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SENEVIRATNE, S. I. et al. Weather and climate extreme events in a changing climate. In: IPCC AR6 WGI. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

SIDDIQUI, S. A. et al. A systematic review and meta-analysis of the impact of environmental heat exposure on cardiovascular diseases, chronic respiratory diseases and diabetes mellitus in low- and middle-income countries. *Environmental Research*, v. 282, 121980, 2025.

UTTAJUG, A. et al. Effects of coexposure to air pollution from vegetation fires and extreme heat on mortality in Upper Northern Thailand. *Environmental Science & Technology*, v. 58, p. 9945-9953, 2024.

WANG, C. et al. Changes in global heatwave risk and its drivers over one century. *Earth's Future*, v. 12, n. 10, e2024EF004430, 2024.

ZHAO, Q. et al. The association between heatwaves and risk of hospitalization in Brazil: a nationwide time series study between 2000 and 2015. *PLOS Medicine*, v. 16, e1002753, 2019.

ZHOU, S. et al. Lethal heat and humidity events. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 50, p. 247-272, 2025.