

# Ondas de calor e a agricultura irrigada<sup>1</sup>

[Derblai Casaroli](#), [José Alves Júnior](#)

O desequilíbrio climático é uma consequência do aquecimento global, o qual se refere ao aumento da temperatura média do planeta, promovido pelo aumento das concentrações de gases de efeito estufa, ocasionado principalmente pela ação antropogênica. Esse aquecimento eleva a linha de base térmica, tornando eventos extremos mais frequentes e intensos. Dentre esses, os extremos de calor e de seca agem de forma concomitante sobre a agricultura mundial, de modo a ocasionar quebras de produtividade de determinados produtos agrícolas. As ondas de calor têm relevante papel nesse contexto, pois, além de promoverem o estresse térmico, também intensificam o estresse hídrico.

Exemplos de eventos meteorológicos extremos incluem ondas de calor e de frio, inundações, precipitações pluviais intensas, secas, tornados e ciclones tropicais, dentre outros. Além da variabilidade climática natural, a mudança climática (ou desequilíbrio climático) reproduz eventos extremos de forma mais frequente e mais intensa, os quais têm causado impactos adversos generalizados tanto às perdas e danos relacionados à natureza quanto às pessoas. Assim, é essencial que as comunidades meteorológicas aprimorem a compreensão e a caracterização desses eventos extremos no tempo e no espaço, com metodologias regional e globalmente consistentes.

Contudo, como o clima varia regionalmente, a definição de um evento climático ou meteorológico extremo e seus limites variam de um local para outro. A definição também depende da infraestrutura de cada país e, na maioria dos países, do ciclo sazonal. Sendo assim, um valor extremo de um determinado elemento climático em um local pode estar dentro da

faixa normal em outro local. Há também razões práticas, além de razões naturais e geográficas, para as diferentes definições, pois um dado setor social pode exigir limites específicos para a tomada de decisão.

Os sistemas agrícolas estão entre os mais vulneráveis à mudança climática. O aumento previsto na frequência de secas, chuvas torrenciais e altas temperaturas, bem como outros estresses abióticos (salinidade do solo e contaminação por metais pesados), serão também acompanhados por um aumento na ocorrência de pragas e doenças. Assim, os cenários futuros de aquecimento global mostram intensificação significativa de insegurança alimentar, tanto em termos de gravidade quanto de extensão. Dentre os principais eventos que afetam diretamente as áreas agrícolas têm-se as secas e as altas temperaturas (integradas às ondas de calor), as quais são responsáveis pelo estresse hídrico e térmico das plantas cultivadas.

Contudo, para mitigar os efeitos tanto do déficit hídrico quanto do estresse térmico, destaca-se a importância da irrigação para uma agricultura sustentável.

## *Ondas de calor: definições e mecanismos*

A circulação atmosférica associada às ondas de calor tem sido amplamente estudada, estando relacionada a sistemas anticiclônicos *quase-estacionários*, caracterizados por um longo período de subsidência<sup>2</sup> de massas de ar, produzindo estresse térmico. Esses anticiclones promovem a advecção<sup>3</sup> de ar quente e úmido de latitudes tropicais, produzindo anomalias positivas de temperatura na região afetada, que persistem por alguns dias consecuti-

<sup>1</sup> Síntese de palestra proferida no dia 11 de junho de 2025, pelo professor Dr. Derblai Casaroli, intitulada: “Ondas de Calor e a Agricultura Irrigada”, a qual foi realizada no Auditório Farnese Dias Maciel Neto, na Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás (EA/UFG). O evento foi organizado pelo Grupo de Estudos em Tecnologias Agrícolas (GETA), em parceria com a Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem (ABID) e com o Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada (Inovagri), ambos na pessoa do professor Dr. José Alves Júnior, e fez parte da semana comemorativa do dia nacional da “Agricultura Irrigada”, comemorado no dia 15 de junho.

<sup>2</sup> Fenômeno meteorológico onde uma massa de ar desce em direção à superfície terrestre.

<sup>3</sup> Transporte horizontal de ar quente das regiões tropicais para outras áreas, como zonas temperadas ou subtropicais.

vos, levando a eventos climáticos prolongados e extremos.

Uma onda de calor é um fenômeno meteorológico generalizado, o qual resulta no aumento de riscos à saúde humana (incluindo a mortalidade), perdas agrícolas, incêndios florestais e cortes de energia, dentre outros. Os centros nacionais de serviços meteorológicos e hidrológicos (do inglês: National Meteorological and Hydrological Services - NMHS) ao redor do mundo, equivalentes ao brasileiro Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), são obrigados a fornecer alertas sobre ondas de calor para ajudar os tomadores de decisão a minimizar esses riscos e potenciais danos. Atualmente, não existe uma definição universalmente aceita de onda de calor. No entanto, muitos membros adotaram critérios locais para a emissão de alertas sobre ondas de calor. De acordo com o vocabulário meteorológico internacional da Organização Meteorológica Mundial (OMM), ou da sigla em inglês WMO (World Meteorological Organization), uma onda de calor é o “aquecimento acentuado do ar, ou a invasão de ar muito quente, em uma grande área, podendo ter uma duração de alguns dias até algumas semanas”. A publicação “Ondas de Calor e Saúde: Orientações para o Desenvolvimento de Sistemas de Alerta” (WMO, 2015), desenvolvida em conjunto pela WMO e pela Organização Mundial da Saúde (OMS), fornece orientações práticas para lidar com os impactos e alertas à saúde humana associada às ondas de calor. Ainda, no glossário do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), uma onda de calor é “um período quente, com temperaturas anormais, frequentemente, definido com referência a um limiar de temperatura relativa, com duração de dois dias ou até meses”.

Vale destacar que as definições da WMO e do IPCC descrevem o evento de forma ampla, podendo não ser suficientes para orientar os NMHSs no desenvolvimento de metodologias e ferramentas práticas para um sistema de monitoramento de ondas de calor, as quais permitam comparações entre os locais. Com base na literatura citada, o Task Team on the Definition of Extreme Weather and Climate Events (TT-DEWCE) reconheceu que, para o intercâmbio internacional de informações sobre ondas de calor, é particularmente útil adotar uma abordagem simples, que permita uma análise consistente das

informações sobre ondas de calor, em níveis regional e global.

A própria WMO (2001) definiu ondas de calor como: “um período de tempo quente incomum e acentuado (temperatura máxima, mínima e média diária) em uma região, persistindo por pelo menos três dias consecutivos, com temperaturas acima dos limites climatológicos, durante o período quente do ano”.

O Inmet segue o conceito da WMO (2001), considerando que: “uma onda de calor é caracterizada quando as temperaturas máximas diárias ultrapassam em 5°C, ou mais, a média mensal por no mínimo cinco dias consecutivos”. Além disso, essas condições devem abranger uma área ampla.

Vale destacar que há limitações nessas definições, pois o fato de a temperatura variar em relação à “Normal Climatológica”<sup>4</sup> (média histórica) pode não ser necessariamente decorrente de uma onda de calor, a depender da região estudada; bem como a duração da onda de calor não precisa ser obrigatoriamente superior a cinco dias consecutivos.

Ainda, diversos índices de ondas de calor são frequentemente elaborados para diferentes atividades (ex. saúde humana, incêndios florestais, agricultura, etc.). Em um país continental como o Brasil, com uma população altamente diversa e regiões com diferentes características atmosféricas, torna-se importante adotar um índice versátil. Índices baseados em limites absolutos tendem a ser menos adequados para aplicação em algumas sub-regiões. Alternativas aos limites absolutos são os limites baseados em percentis, que definem as ondas de calor como eventos que excedem um limite relativo à área de interesse, e não um limite universal absoluto. Em particular, esses métodos baseados em percentis permitem uma comparação mais robusta dos resultados entre as diferentes regiões (ex. brasileiras) e são mais adequados para uso em um contexto de mudança climática. Como exemplo, podem ser citados os índices baseados no percentil 90 das temperaturas máxima (CTX90pct) e mínima (CTN90pct) (Geirinhas *et al.*, 2018). Esses índices já foram utilizados para descrever as ondas de calor sobre a América do Sul. Assim,

<sup>4</sup> Média de qualquer elemento climático, obtida por um período igual ou superior a 30 anos de observação.

os autores definiram uma onda de calor como um período de três ou mais dias consecutivos, caracterizado por temperaturas máximas ( $T_{\max}$ ) e mínimas ( $T_{\min}$ ) diárias acima do 90º percentil tanto de  $T_{\max}$  (CTX90pct) quanto de  $T_{\min}$ , dentro do calendário climatológico (normal climatológica), calculadas em uma janela de 15 dias (centralizada no dia em questão). Nesse procedimento, um valor limite de percentil diferente é calculado para cada dia do ano, a fim de levar em consideração o ciclo sazonal. Esses dois índices se mostraram eficazes na definição e identificação de eventos de onda de calor tanto no território australiano quanto no brasileiro, os quais são semelhantes em termos de extensão espacial e amplitudes de variabilidade climática regional.

As ondas de calor estão associadas a certos mecanismos que contribuem tanto para sua formação quanto para a manutenção, tais como:

i) Sistemas de alta pressão atmosférica: esses sistemas, também denominados de anticiclônicos estacionários, bloqueiam a passagem de frentes frias, mantêm o ar seco e estável e dificultam a convecção. Esse fenômeno de bloqueio atmosférico é responsável por sustentar condições de aquecimento por vários dias;

ii) Mudança climática: o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera intensifica o aquecimento global, contribuindo para o aumento da frequência e intensidade das ondas de calor. Alguns estudos de atribuição já confirmam a influência antropogênica em ondas de calor;

iii) Fenômeno El Niño: mudanças nos padrões de circulação atmosférica podem influenciar na ocorrência de ondas de calor em diferentes regiões brasileiras;

iv) Realimentação solo-atmosfera: solos secos reduzem a evapotranspiração, deslocando o balanço de energia para o calor sensível. Essa retroalimentação positiva intensifica e prolonga as ondas de calor, particularmente em áreas agrícolas expostas à estiagem;

v) Urbanização e ilha de calor: nas áreas urbanas, a substituição da vegetação por superfícies impermeáveis, associada à menor evapotranspiração e maior armazenamento de calor, amplifica a intensidade e a duração das ondas de calor, afetando, inclusive, áreas de agricultura periurbana<sup>5</sup>.

### *Eventos de onda de calor*

Estudos relataram eventos de ondas de calor sobre a América do Sul, identificando um total de 191 eventos entre 1979 e 2019 ([Araújo et al., 2022](#)). Ainda, os mesmos autores concluíram que a área mais quente se estende de nordeste a sudoeste da América do Sul central, a qual se destacou por apresentar maiores frequências de episódios intensos de ondas de calor. Além disso, em todo o continente, houve aumento significativo na intensidade e persistência de ondas de calor no período avaliado.

Especialistas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) estabeleceram um período de referência (1961-1990) e efetuaram análises segmentadas para três períodos: 1991-2000, 2001-2010 e 2011-2020. Assim, os dados evidenciaram aumento gradual das anomalias de ondas de calor ao longo dos períodos analisados para quase todo o Brasil, excluindo-se a região Sul, a metade sul do estado de São Paulo e o sul do Mato Grosso do Sul. No período de referência, o número de dias com ondas de calor não ultrapassava sete. Já para o período de 1991-2000 subiu para 20 dias; entre 2001-2010 atingiu 40 dias; e, de 2011-2020, o número de dias com ondas de calor chegou a 52 (Figura 1) ([INPE, 2023](#)).

Outro estudo apresentou distinção nos resultados ao avaliar a evolução dos eventos de onda de calor para o Brasil (utilizando TX90p e TN90p) ([Geirinhas et al., 2017](#)), o qual também identificou tendências positivas e estatisticamente significativas no aumento na frequência de ondas de calor durante o período de 1981 a 2014 particularmente fortes para as cidades de São Paulo, Recife e Manaus. Além do aquecimento regional induzido pela mudança climática, as tendências positivas identificadas também estão relacionadas aos efeitos de “ilha de calor”<sup>6</sup> urbana e uso do desmatamento. Além disso, o fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS)<sup>7</sup> e a circulação da brisa marítima também podem desempenhar papel

<sup>5</sup> Zonas de transição entre o ambiente estritamente rural e o urbano.

<sup>6</sup> Fenômeno climático em que uma área urbana apresenta temperaturas do ar mais altas do que as áreas rurais circundantes, pois um “bolsão de ar” quente é formado devido à urbanização.

<sup>7</sup> El Niño Oscilação Sul (ENOS): o El Niño e a La Niña são partes de um mesmo fenômeno acoplado (atmosférico-ocênico), que ocorre no oceano Pacífico Equatorial (e na atmosfera adjacente), denominado de El Niño Oscilação Sul (ENOS). A fase El Niño refere-se ao aquecimento do oceano Pacífico Equatorial (> média histórica) e a fase La Niña refere-se ao resfriamento.

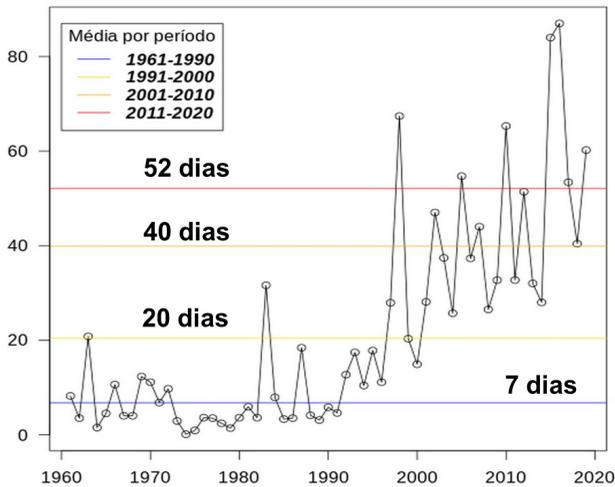


Figura 1. Número de dias com ondas de calor registradas a cada ano no Brasil. Onda de calor:  $\geq 6$  dias consecutivos com  $T_{\max} \geq 10\%$  do período de referência (TX90p). Fonte: adaptado de [INPE \(2023\)](#).

importante no aumento e/ou enfraquecimento das condições regionais de temperatura.

#### *Impactos dos extremos climáticos na agricultura*

Os extremos de temperatura podem ocasionar estresse térmico nas plantas agrícolas. Esse estresse refere-se ao impacto negativo das temperaturas (mínimas e máximas) no desenvolvimento e funcionamento das plantas, ocorrendo danos fisiológicos e metabólicos que podem afetar o crescimento, produção e, em casos extremos, até a sobrevivência das plantas.

Sabe-se que a agricultura é fortemente afetada por fatores climáticos extremos. Em geral, a gravidade dos impactos do calor extremo e da seca triplicaram nos últimos 50 anos ([IPCC, 2022](#)). Altas temperaturas causam estresse térmico em diversas culturas, com efeitos negativos no crescimento e desenvolvimento das plantas que variam de acordo com a cultura. O déficit hídrico também é um fator limitante para o crescimento de muitas culturas de sequeiro, podendo afetar negativamente seu desenvolvimento. As maiores perdas de produtividade induzidas pela seca são observadas em leguminosas e raízes e/ou tubérculos. Além disso, a resposta das culturas a esses estresses depende do estágio de desenvolvimento, sendo os estágios reprodutivos mais sensíveis do que os estágios vegetativos. Em escala

global, o estresse térmico desempenha papel tão importante quanto a seca nas perdas de produtividade das culturas, e impõe risco crescente à produção agrícola, particularmente em áreas continentais, nas latitudes médias e altas do hemisfério norte.

Vale destacar que o aumento da temperatura é reflexo de um aumento de energia (na forma de calor) no ambiente, o qual promove maior evapotranspiração nas áreas cultivadas, ocasionando, assim, déficits hídricos mais severos e mais prolongados. Dessa forma, o déficit hídrico é frequentemente associado às ondas de calor ou extremos térmicos, podendo elevar os níveis de danos às culturas. Estudos recentes sugerem que esses dois estressores podem atuar de forma aditiva, visto que as perdas de produtividade são aumentadas quando a seca e as altas temperaturas ocorrem simultaneamente. Para culturas de cereais e leguminosas de sequeiro, acredita-se que a principal causa das perdas de produtividade seja o impacto da combinação entre o calor e o déficit hídrico em seus processos reprodutivos ([Sinha et al., 2021](#)).

[Fiorini et al. \(2024\)](#) fizeram uma revisão sistemática da literatura e detectaram padrões regionais de tendências positivas e negativas devido à mudança climática (indutora de extremos climáticos), em que 67% dos estudos avaliados relatam impactos negativos, 15% tanto negativos quanto positivos, 11% relações neutras e apenas 7% revelam efeitos positivos. Nesse estudo, os autores detectaram perdas de produtividade para as culturas do feijão-comum (-22%), mandioca (-18%), cacau (-89%), milho (-1%), arroz (-42%) e trigo (-34%). Por outro lado, a castanha-do-pará (15%), o café (3%), a soja (1%) e a cana-de-açúcar (3%) registraram aumento (Figura 2). Autores relatam que a cultura da soja tem seu aumento atribuído à maior concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera e ao efeito fototérmico. Além disso, as culturas do milho, do feijão-comum e da mandioca, quando cultivadas no Rio Grande do Norte, em anos mais úmidos, com índices pluviométricos extremos, levam ao aumento da produção, sobretudo na agricultura familiar.

#### *Irrigação para mitigar os extremos climáticos*

A irrigação é uma ferramenta importante para mitigar tanto o estresse hídrico (principal) quanto o

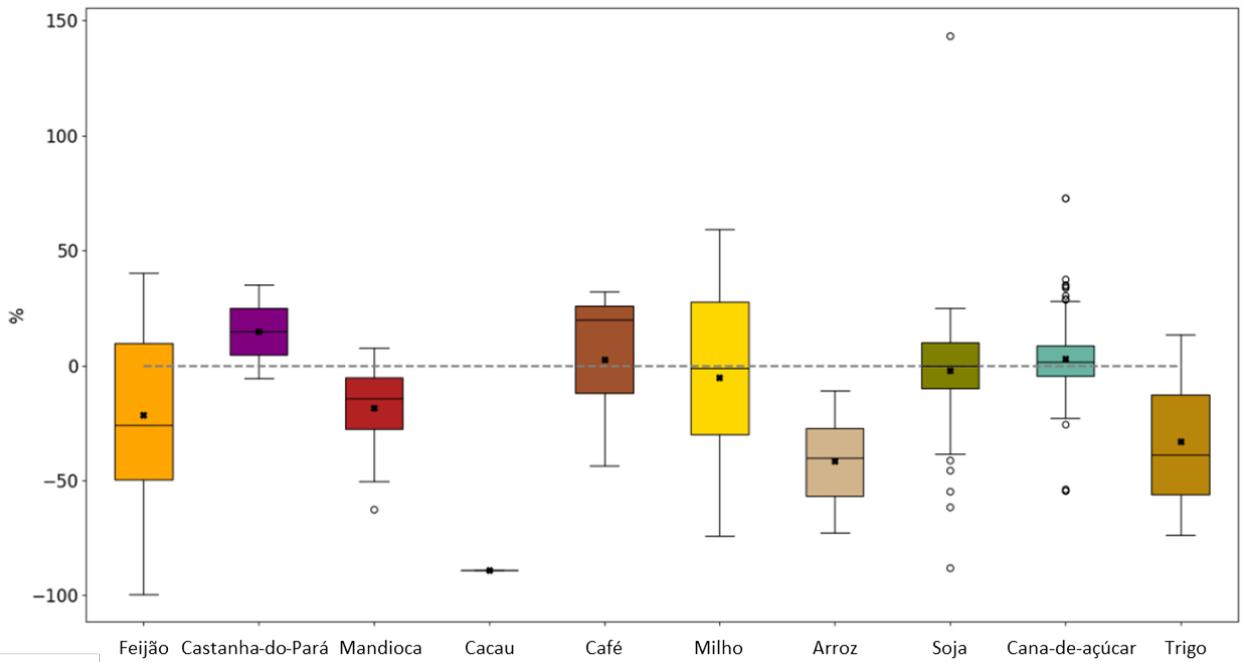


Figura 2. Impactos das mudanças climáticas na produtividade das lavouras brasileiras (%). Fonte: Adaptado de [Fiorini et al. \(2024\)](#).

estresse térmico em plantas cultivadas, auxiliando na manutenção da temperatura do solo e da umidade em níveis favoráveis, refletindo em um ambiente satisfatório para as plantas. Em estudos realizados na Planície do Norte da China, com dois híbridos de milho (estádio de enchimento de grãos) verificou-se que a taxa de fotossíntese líquida aumentou em 20%, e a temperatura do dossel diminuiu de 1 a 3°C nos tratamentos irrigados sob estresse térmico, em relação ao não irrigado ([Wang et al., 2023](#)). Com isso, é possível manter a evapotranspiração<sup>8</sup> das culturas, proporcionando trocas gasosas entre as plantas e o ambiente (sai vapor de água e entra CO<sub>2</sub>), favorecendo a fotossíntese (+crescimento, +desenvolvimento e +produção) e inibindo o estresse térmico, pois a energia do meio se transforma em “crescimento” e não calor (menor temperatura foliar). Além disso, essa umidade no solo melhora a absorção de nutrientes pelas raízes das plantas, garantindo maior tolerância ao estresse térmico e/ou outras injúrias.

Estudos evidenciam os efeitos da temperatura e da precipitação sobre a produtividade da soja na região conhecida como Matopiba ([Silva et al., 2023](#)). Essa pesquisa estimou uma redução de 6%

na produtividade da soja para cada aumento de 1°C na temperatura do ar. Com base em observações históricas, as tecnologias agrícolas não proporcionam adaptação ao calor extremo e criaram uma dependência de investimentos em irrigação. Assim, para mitigar esses impactos negativos, os agricultores do Cerrado estão recorrendo cada vez mais à irrigação; mas estudos sugerem cautela no uso tanto das águas superficiais quanto das subterrâneas, a fim de promover a sustentabilidade dos sistemas agrícolas ([Richey et al., 2015](#)).

Embora dados oficiais brasileiros ([Conab, 2020](#)) mostrem que a produtividade e a produção agrícola têm crescido desde meados da década de 1980, [Rattis et al. \(2021\)](#) sugerem que o aquecimento (1º lugar) e a seca (2º lugar) já representam sérias ameaças a esse sistema. A realização de duas safras tem sido tentada ao longo da região Amazônia-Cerrado ([Spera et al., 2016](#)), mas secas recorrentes e atrasos no início da estação chuvosa ([Leite-Filho et al., 2020](#)) têm dificultado seu sucesso, especialmente fora do centro do Mato Grosso e do oeste de Goiás ([Cohn et al., 2016](#)).

Para elucidar a relação entre a temperatura da superfície e a agricultura irrigada, [Zhu e Burney \(2022\)](#) determinaram, com abrangência estadual (municípios do Nebraska, EUA), que a irrigação

<sup>8</sup> Perdas de água na forma de vapor de uma superfície vegetada (evapotranspiração = evaporação do solo + transpiração das plantas).

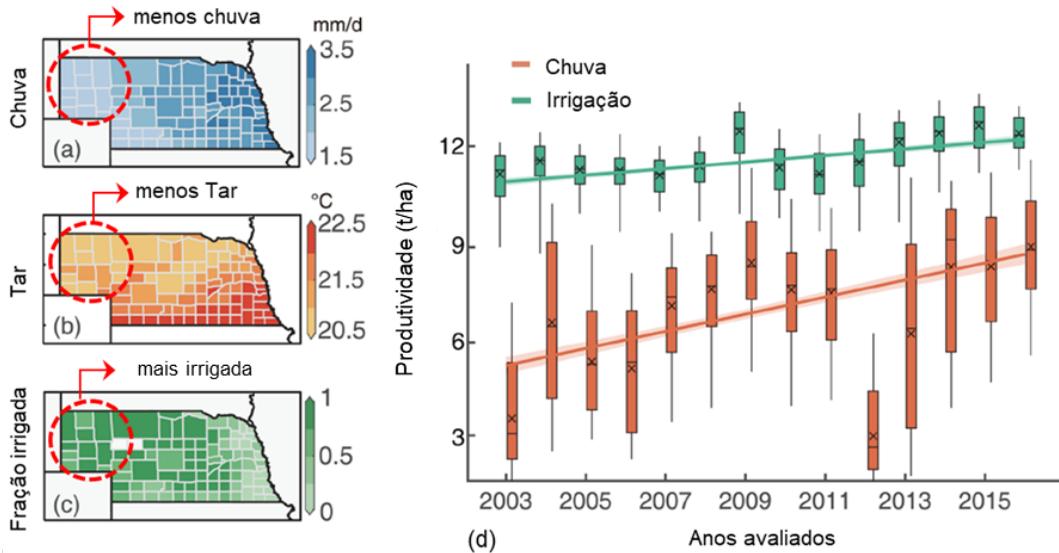


Figura 3. Padrão espacial da chuva média diária plurianual (2003-2016) em nível de município (a) e da temperatura do ar [Tar] (b) durante a estação de cultivo de milho. Fração média de irrigação do milho plurianual (2003-2016) em nível de município em Nebraska (c). Boxplot da produtividade do milho irrigado e de sequeiro em nível de município em Nebraska durante o período de estudo (d). As linhas em (d) mostram a tendência linear ajustada da produtividade com um intervalo de confiança de 95%. Os boxplots indicam a mediana (linha horizontal), a média (cruz), o intervalo interquartil (caixa) e o 5º ao 95º percentil (linhas oblíquas) da produtividade de sequeiro ou irrigado. Fonte: Adaptado de [Zhu e Burney \(2022\)](#).

não apenas reduziu o estresse hídrico e térmico, mas também enfraqueceu a resposta da produtividade a esses estresses (Figura 3).

Especificamente, o estresse térmico foi significativamente enfraquecido para os processos reprodutivos do milho irrigado. Ainda, a pesquisa sugeriu que a irrigação foi responsável pelo alívio do estresse hídrico e de alta temperatura, ocasionando ganhos de produtividade na ordem de  $65 \pm 10\%$  e  $35 \pm 5,3\%$ , respectivamente. Esse estudo também destaca a importância relativa do alívio do estresse de alta temperatura na melhoria da produtividade e a necessidade de simular a temperatura da superfície da cultura para melhor quantificar os efeitos do estresse térmico em modelos de produtividade. Finalmente, considerando-se a interação potencialmente forte entre estresse hídrico e térmico, pesquisas futuras sobre os benefícios da irrigação devem explorar os efeitos da interação entre o calor e o alívio da seca.

Outra forma de utilizar a irrigação como um fator mitigador do estresse térmico é aspergir o dossel das plantas. Assim, há um gasto de energia do meio para evaporar a água inserida no dossel das plantas, diminuindo a temperatura daquele microclima. O resfriamento do dossel é uma prática agrônômica ado-

tada, principalmente, em situações específicas, como pomares ou pequenas plantações de frutas ([Evans, 2004](#)), vinhedos ([Caravia et al., 2017](#)) e ambientes controlados ([Leyva et al., 2015](#)).

### Considerações finais

As ondas de calor resultam de processos atmosféricos complexos, amplificados por condições de superfície e pelo desequilíbrio climático de origem antrópica. A compreensão dos mecanismos que as geram é fundamental para o planejamento agrícola, especialmente em um cenário de aumento de eventos extremos. Neste texto é possível destacar dois pontos: i) o estresse térmico impacta negativamente na produtividade das culturas, e esse impacto tem aumentado ao longo do tempo; ii) a irrigação, além de maximizar a produtividade de áreas agrícolas, também compensa parcialmente o impacto negativo do estresse térmico.

Além disso, devido às previsões de aumento da temperatura e aumento da demanda hídrica, a integração entre o monitoramento climático, manejo adaptativo e políticas públicas torna-se cada vez mais essencial para reduzir a vulnerabilidade e preservar a competitividade do setor agrícola.