Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação — REASE

doi.org/10.51891/rease.v12i11.32781

IMPACTO DAS ALTAS TEMPERATURAS NO DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO TRIGO

IMPACT OF HIGH TEMPERATURES ON WHEAT CROP DEVELOPMENT AND PRODUCTIVITY

IMPACTO DE LAS ALTAS TEMPERATURAS EN EL DESARROLLO Y LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE TRIGO

Mário Luiz Biolo Filho[1]
Eduardo Henrique Baltrusch de Gois[2]

RESUMO: A cultura do trigo (Triticum aestivum L.) desempenha um papel fundamental na produção agrícola brasileira e na segurança alimentar global. Contudo, por ser uma espécie originária de clima temperado, apresenta elevada sensibilidade às variações térmicas e ao calor excessivo ao longo do seu ciclo biológico. Este estudo teve como objetivo analisar os impactos das altas temperaturas no desenvolvimento e na produtividade da cultura do trigo no Brasil. Para isso, foi realizada uma revisão integrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo, abrangendo publicações em português e inglês no período de 1969 a 2026 nas bases Periódicos CAPES, SciELO e Google Scholar, além de documentos técnicos de instituições como Embrapa e CONAB. Os resultados indicaram que o estresse térmico afeta todas as etapas do ciclo, reduzindo o perfilhamento e a biomassa na fase vegetativa, causando abortamento floral e infertilidade do pólen na fase reprodutiva, e encurtando a janela de enchimento de grãos. Além disso, a combinação de calor e alta umidade favorece a incidência de fitopatógenos, como a giberela e a brusone. Concluiu-se que o estresse por calor compromete tanto o rendimento quanto a qualidade industrial dos grãos, evidenciando que o planejamento da época de semeadura com base no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), o manejo adequado e o uso de cultivares geneticamente tolerantes ao calor, são estratégias vitais para mitigar os danos térmicos e assegurar a sustentabilidade da triticultura nacional.

Palavras-chave: Triticum aestivum. Estresse térmico. Temperaturas elevadas. Produção.

ABSTRACT: Wheat (Triticum aestivum L.) plays a fundamental role in Brazilian agricultural production and global food security. However, as a species originating from temperate climates, it exhibits high sensitivity to thermal variations and excessive heat throughout its biological cycle. This study aimed to analyze the impacts of high temperatures on wheat crop development and yield in Brazil. To this end, an integrative literature review of qualitative approach and descriptive nature was conducted, encompassing publications in Portuguese and English from 1969 to 2026 retrieved from Periódicos CAPES, SciELO, and Google Scholar databases, as well as technical documents from institutions such as Embrapa and CONAB. The results indicated that heat stress affects all stages of the cycle, reducing tillering and biomass during the vegetative phase, causing floral abortion and pollen sterility in the reproductive phase, and shortening the grain filling window. Furthermore, the combination of heat and high humidity promotes the incidence of phytopathogens such as Fusarium head blight and wheat blast. It was concluded that heat stress compromises both grain yield and industrial quality, highlighting that sowing time planning based on Agricultural Climate Risk Zoning (ZARC), proper management, and the use of heat-tolerant cultivars are vital strategies to mitigate thermal damage and ensure the sustainability of national wheat production.

[1] Estudante de Agronomia. Faculdade Cristo Rei (FACCREI), Cornélio Procópio, PR.
[2] Orientador. Coordenador do curso de Agronomia. Faculdade Cristo Rei (FACCREI), Cornélio Procópio, PR.

Keywords: Triticum aestivum. Heat stress. Elevated temperatures. Production.

RESUMEN: El cultivo de trigo (Triticum aestivum L.) desempeña un papel fundamental en la producción agrícola brasileña y en la seguridad alimentaria global. Sin embargo, por ser una especie originaria de clima templado, presenta una elevada sensibilidad a las variaciones térmicas y al calor excesivo a lo largo de su ciclo biológico. Este estudio tuvo como objetivo analizar los impactos de las altas temperaturas en el desarrollo y la productividad del cultivo de trigo en Brasil. Para ello, se realizó una revisión integradora de la literatura, de enfoque cualitativo y carácter descriptivo, que abarcó publicaciones en portugués e inglés entre los años 1969 y 2026 en las bases de datos Periódicos CAPES, SciELO y Google Scholar, además de documentos técnicos de instituciones como Embrapa y CONAB. Los resultados indicaron que el estrés térmico afecta a todas las etapas del ciclo, reduciendo el ahijamiento y la biomasa en la fase vegetativa, causando aborto floral e infertilidad del polen en la fase reproductiva y acortando la ventana de llenado de los granos. Asimismo, la combinación de calor y alta humedad favorece la incidencia de fitopatógenos como la fusariosis de la espiga y la piricularia o brusone del trigo. Se concluyó que el estrés por calor compromete tanto el rendimiento como la calidad industrial de los granos, evidenciando que la planificación de la época de siembra basada en el Zonificación Agrícola de Riesgo Climático (ZARC), el manejo adecuado y el uso de cultivares genéticamente tolerantes al calor son estrategias vitales para mitigar los daños térmicos y asegurar la sostenibilidad de la triticultura nacional.

Palabras clave: Triticum aestivum. Estrés térmico. Temperaturas elevadas. Producción.

1 INTRODUÇÃO

A cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) desempenha um papel fundamental na produção agrícola e na segurança alimentar global, sendo a matéria-prima base para a fabricação de farinhas, pães, massas e biscoitos (Abitrigo, 2023). No contexto da agricultura brasileira, a triticultura historicamente consolidada na Região Sul expandiu-se nas últimas décadas para regiões tropicais do Centro-Oeste e Sudeste, ocupando áreas sob irrigação por pivô central e sistemas de safrinha (Embrapa, 2026a). Essa ampliação da área cultivada relaciona-se diretamente à necessidade de compreender os fatores ambientais que afetam o desempenho do cultivo em ecossistemas mais quentes. Dentre as diversas variáveis microclimáticas que atuam no ambiente agrícola, a temperatura destaca-se como um elemento determinante para a expressão do potencial genético da planta. Assim, o monitoramento das exigências térmicas do trigo torna-se imprescindível para garantir o sucesso produtivo e a sustentabilidade das lavouras em diferentes regiões do país.

Por se tratar de uma espécie originária de regiões de clima temperado, o trigo apresenta sensibilidade acentuada às oscilações térmicas e ao excesso de calor ao longo de todo o seu ciclo biológico. Ao longo do desenvolvimento, a planta passa por fases marcadas por transições fisiológicas descritas em escalas como as de Feeks-Large e Zadoks (Cunha; Caierão, 2023). Quando exposto a temperaturas elevadas, o vegetal sofre profundas alterações metabólicas, como o fechamento estomático para contenção da desidratação, a degradação acelerada de

pigmentos fotossintéticos e o aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (Alvarenga, 2021; Rissi, 2022). A elevação térmica além dos limites cardinais acelera a velocidade das reações enzimáticas, provocando a transição precoce entre as etapas do ciclo (Porter; Gawith, 1999). Esse estresse abiótico limita a interceptação da radiação solar e reduz o acúmulo de biomassa seca essencial ao rendimento final.

Outro aspecto crítico decorrente do aumento da temperatura refere-se à dinâmica do complexo fitossanitário da cultura do trigo. A elevação térmica, principalmente quando combinada a episódios de elevada umidade relativa e molhamento foliar, cria um ambiente microclimático altamente favorável ao desenvolvimento de epidemias fúngicas (Embrapa, 2020a). Doenças de grande impacto econômico, como a giberela (*Fusarium graminearum*), que infecta as anteras durante a antese, e a brusone do trigo (*Magnaporthe oryzae* t *Triticum*), encontram nessas condições o cenário ideal para rápida dispersão (Embrapa, 2024). Além de reduzir a área foliar fotossinteticamente ativa por meio de lesões e necroses, esses fitopatógenos promovem o abortamento de espiguetas, o estrangulamento da raque e a contaminação dos grãos por micotoxinas nocivas, agravando severamente as perdas causadas diretamente pelo estresse térmico.

Nesse cenário, torna-se altamente relevante compreender de que maneira as altas temperaturas afetam a produtividade e a qualidade industrial do trigo colhido no mercado brasileiro. O estudo desse impacto ganha urgência diante do avanço das oscilações climáticas globais e da maior frequência de ondas de calor durante o ciclo agrícola (Fao, 2026). De acordo com os boletins agrometeorológicos e pesquisas de melhoramento genético, junto com documentos das quebras de safra e perdas de rendimento provocadas pelo calor excessivo de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2026), permanece a necessidade de sintetizar e integrar esses dados sob uma perspectiva ampla e multidisciplinar. Compreender a interação entre a fenologia da cultura, as exigências térmicas e os componentes de rendimento é essencial para subsidiar o ZARC, e auxiliar produtores na escolha de épocas de semeadura e cultivares tolerantes.

Apesar dos avanços observados no melhoramento genético e no manejo agronômico, ainda é necessário aprofundar o conhecimento sobre a magnitude dos danos em fases de alta vulnerabilidade, como o emborrachamento, a floração e o enchimento de grãos. Nestas etapas, o calor extremo prejudica a viabilidade do pólen, induz a esterilidade floral e restringe a translocação de amido para as cariopses (Farooq *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2026). Diante do exposto, a presente pesquisa foi orientada pela seguinte questão de pesquisa: quais são os principais

impactos das altas temperaturas sobre o desenvolvimento, os componentes de rendimento e a produtividade da cultura do trigo no Brasil?

Para responder de forma criteriosa à questão proposta, o estudo teve como objetivo geral analisar, por meio de uma revisão integrativa da literatura científica, os impactos das altas temperaturas sobre o desenvolvimento e a produtividade da cultura do trigo no Brasil, considerando os efeitos do estresse térmico nas diferentes fases do ciclo da planta, nos componentes de produtividade e na qualidade dos grãos. Adicionalmente, buscou-se identificar as etapas de maior sensibilidade ao calor, avaliar as consequências para o complexo fitossanitário e descrever as estratégias de manejo e seleção de genótipos adaptados (Sarkar *et al.*, 2021).

A realização deste estudo justifica-se pela necessidade de oferecer subsídios técnicos que auxiliem na mitigação dos danos térmicos e no planejamento das safras brasileiras. A identificação dos gargalos fisiológicos provocados pelo calor contribui para o aprimoramento de sistemas produtivos em regiões tradicionais e de expansão tropical (Teixeira, 2020; Pereira *et al.*, 2024). Além disso, a sistematização do conhecimento atualizado auxilia na definição de estratégias de convivência com o clima, alinhando a escolha genotípica, o manejo nutricional e a irrigação à busca pela estabilidade e segurança alimentar (Akmal; Alotaibi, 2021).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A cultura do trigo

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma das principais espécies cultivadas mundialmente e apresenta grande importância para a alimentação humana, sendo utilizado principalmente na produção de farinha, pães, massas, biscoitos e diversos outros produtos alimentícios. A cultura também possui relevância econômica e social, uma vez que participa de cadeias produtivas que envolvem produtores rurais, cooperativas, indústrias de moagem, fabricantes de alimentos e o mercado consumidor. Dessa forma, fatores que interferem na produtividade e na qualidade dos grãos de trigo apresentam importância tanto para a produção agrícola quanto para a segurança alimentar.

O trigo pertence à família Poaceae e apresenta metabolismo fotossintético do tipo C3. Seu desenvolvimento é fortemente influenciado pelas condições ambientais, principalmente pela temperatura, disponibilidade hídrica, radiação solar e características do solo. Entre esses fatores, a temperatura exerce papel fundamental na determinação da velocidade de

desenvolvimento da planta e na duração das diferentes fases fenológicas da cultura (Castro e Kluge, 1999).

Historicamente, o cultivo do trigo no Brasil teve início ainda no período colonial, por volta de 1534, na Capitania de São Vicente, expandindo-se posteriormente para a Região Sul devido às condições climáticas mais favoráveis. No entanto, a consolidação e o avanço expressivo da triticultura nacional ocorreram ao longo do século XX, impulsionados pela estruturação dos programas de melhoramento genético a partir de 1919. Esses programas focaram na superação de grandes gargalos fitotécnicos e conjuntos de características do solo e do clima de determinado local que influenciam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das plantas, como a elevada toxicidade por alumínio em solos ácidos e a suscetibilidade a doenças fúngicas, destacando-se a ferrugem-da-folha. A criação de instituições de pesquisa, aliada ao desenvolvimento de cultivares adaptadas ao ecossistema tropical e subtropical, permitiu não apenas o aumento expressivo da produtividade nos estados do Sul, mas também a expansão da cultura para a Região do Cerrado no Brasil Central (Caierão *et al.*, 2014).

Ao analisar a distribuição da produção no âmbito estadual, o Paraná e o Rio Grande do Sul figuram como os pilares da triticultura nacional, disputando safra a safra a liderança em volume e área cultivada e respondendo, conjuntamente, por cerca de 80% a 90% de todo o trigo colhido no Brasil. Além dos estados sulistas, destacam-se no cenário produtivo nacional Santa Catarina, São Paulo, Minas Gerais e Goiás, unidades federativas em que a adoção de tecnologias de precisão, sistemas de irrigação por pivô central e o uso de cultivares adaptadas têm garantido elevados tetos produtivos e excelente qualidade tecnológica de grãos (Abitrigo, 2023).

Analisando o panorama atual, as estimativas publicadas nos boletins de acompanhamento de safra da CONAB para o ano de 2026 apontam para uma produção nacional de trigo projetada em cerca de 5,8 a 6,0 milhões de toneladas, registrando um recuo frente a safra anterior impulsionado pelo desestímulo de custos de produção e cautela frente ao risco climático nas regiões produtoras. No cenário internacional, relatórios do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e de organismos globais de monitoramento indicam que a safra mundial de trigo em 2026 caminha para patamares elevados, mantendo a oferta global em volumes expressivos, quadro que reforça o desafio do Brasil em alinhar competitividade interna, estabilidade de preços e autossuficiência do abastecimento nacional.

A vulnerabilidade da produção mundial de trigo em relação às adversidades climáticas reflete-se diretamente na volatilidade e na alta dos preços do grão no mercado global. Segundo

dados divulgados pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Fao, 2026), as ondas de calor registradas em importantes países produtores, aliadas a episódios de seca decorrentes de fenômenos como o El Niño e a incertezas geopolíticas, têm imposto severos abalos na oferta e na estabilidade das colheitas. Essa dinâmica ficou evidente ao constatar-se um salto de 5,8% nos preços mundiais do trigo, motivado principalmente pelas preocupações com a quebra e redução da produtividade, causadas pelas altas temperaturas extremas e por gargalos logísticos. A recorrência desses eventos de calor excessivo reforça a urgência de compreender os impactos fisiológicos do estresse térmico no trigo, uma vez que a menor disponibilidade do cereal compromete a segurança alimentar global e desestabiliza a economia de cadeias agrícolas vitais.

Do ponto de vista ecofisiológico, o ciclo de desenvolvimento do trigo é dividido em fases vegetativas e reprodutivas bem definidas, englobando a germinação, a emergência, o perfilhamento, o espigamento e o posterior enchimento e maturação dos grãos. A duração e a eficiência de cada um desses estádios fenológicos determinam os componentes do rendimento final da cultura, tais como o número de espigas por área, o número de grãos por espiga e o peso de mil grãos. O adequado estabelecimento da lavoura e a expressão do potencial produtivo dependem, portanto, da capacidade da planta em sintetizar e alocar fotoassimilados eficientemente em direção aos drenos reprodutivos ao longo de seu crescimento.

Por apresentar origem em regiões de clima temperado, o trigo (*Triticum aestivum*) possui exigências bioclimáticas específicas que o diferenciam de outras culturas anuais (Manfron; Lazzarotto; Medeiros, 1993). Embora os programas de melhoramento genético tenham viabilizado o desenvolvimento de genótipos mais plásticos e adaptados às condições subtropicais e tropicais do Brasil, a espécie ainda preserva elevada sensibilidade às variações do meio físico. Nesse contexto, variáveis micrometeorológicas, tais como a temperatura e a radiação solar, atuam no controle do desenvolvimento vegetal, de modo que oscilações nas condições meteorológicas locais podem acelerar ou retardar estádios fenológicos determinantes para a produtividade final (Manfron; Lazzarotto; Medeiros, 1993).

Diante da expansão e modernização do cultivo do trigo no Brasil, constata-se que a produtividade e a qualidade dos grãos alcançadas pelas cultivares modernas dependem diretamente da interação entre o genótipo e o ambiente (Manfron; Lazzarotto; Medeiros, 1993). Segundo Manfron, Lazzarotto e Medeiros (1993), por apresentar uma ecofisiologia sensível, a cultura exige condições meteorológicas específicas ao longo do seu ciclo biológico para expressar seu máximo rendimento. Dentre as variáveis abióticas, os fatores térmicos desempenham papel

preponderante no controle dos processos fisiológicos da planta, atuando desde a emergência e o perfilhamento até a fase de enchimento dos grãos, de modo que oscilações extremas e estresses térmicos ao longo do desenvolvimento vegetal podem comprometer significativamente a produtividade final (Manfron; Lazzarotto; Medeiros, 1993).

2.2 Efeitos do estresse térmico nas diferentes fases fenológicas do trigo

O ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo (*Triticum* spp.) é caracterizado por transições morfológicas e fisiológicas estritamente dependentes de fatores ambientais, sendo o acompanhamento técnico dessas fases indispensáveis para o manejo agrícola e para a compreensão de respostas a estresses abióticos. Para o monitoramento científico das transformações que a planta sofre desde a germinação até a maturação, a literatura agronômica adota predominantemente as escalas fenológicas de Feeks, modificada por Large, e a escala decimal de Zadoks. O conhecimento detalhado de tais escalas permite correlacionar os episódios de temperaturas elevadas com as perdas fisiológicas e os impactos diretos na formação dos componentes de rendimento da lavoura. O estresse térmico atua diretamente sobre o metabolismo vegetal, acelerando reações enzimáticas, desregulando o balanço hormonal e encurtando os ciclos de desenvolvimento, o que compromete drasticamente a capacidade fotossintética e a conversão de assimilados em biomassa útil. Diante desse cenário, os danos causados pelas altas temperaturas variam em intensidade e forma conforme o momento do ciclo em que a cultura se encontra exposta (Cunha; Caierão, 2023).

Dentre os principais distúrbios fisiológicos desencadeados pelo calor excessivo, destaca-se a inibição da assimilação líquida de carbono, provocada pelo fechamento estomático induzido para evitar a desidratação excessiva dos tecidos vegetais. Esse mecanismo de defesa, embora evite perdas imediatas de água, restringe severamente a difusão de dióxido de carbono para o interior das folhas, limitando a taxa fotossintética e reduzindo o fluxo de fotoassimilados essenciais para o crescimento. Além disso, as temperaturas elevadas aceleram a degradação de pigmentos fotossintéticos, como as clorofilas, provocando a senescência precoce do dossel e diminuindo a janela de tempo em que a planta dispõe de área foliar verde ativa. Essa abreviação do ciclo vital impede que a planta atinja o seu máximo potencial produtivo, pois o tempo total disponível para a interceptação da radiação solar e acúmulo de matéria seca fica notavelmente restrito (Rissi, 2022).

Sob a ótica biofísica, o estresse térmico também induz a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio no interior das células vegetais, gerando estresse oxidativo que danifica

membranas celulares, proteínas e ácidos nucleicos. As membranas celulares, formadas por bicamadas lipídicas, perdem a sua fluidez e integridade funcional quando submetidas a patamares térmicos superiores aos suportados enzimaticamente, resultando em extravasamento de eletrólitos e perda da compartimentação celular. Para mitigar tais danos, a planta ativa sistemas antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, cujo custo energético é elevado e desvia assimilados que seriam originalmente destinados ao crescimento e à formação de grãos. Consequentemente, a planta investe grande parte de sua energia na sobrevivência celular em detrimento da produtividade agronômica (Alvarenga, 2021).

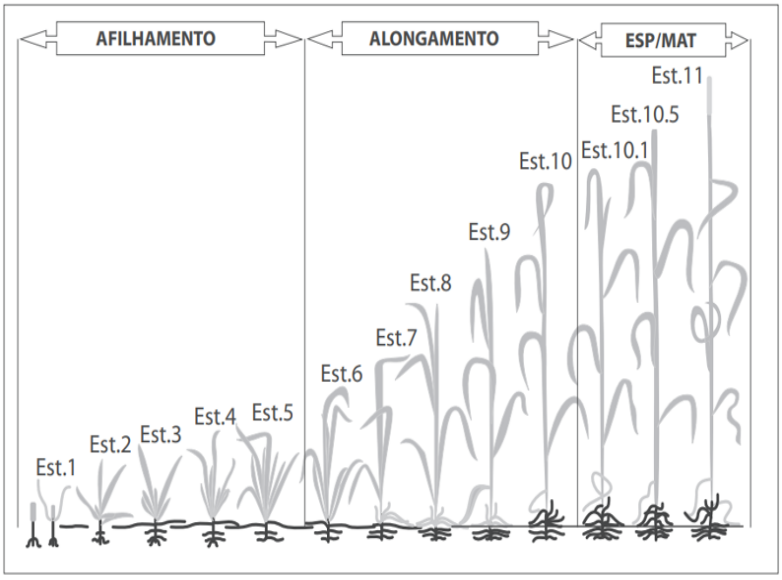
Outro aspecto crítico associado aos efeitos do estresse térmico no trigo refere-se à alteração na partição de assimilados entre os diferentes órgãos da planta ao longo do seu desenvolvimento. Enquanto em condições térmicas ótimas há um equilíbrio na distribuição de carboidratos para o fortalecimento do sistema radicular, colmos e estruturas reprodutivas, o calor excessivo altera essa dinâmica de prioridades metabólicas. Observa-se frequentemente uma redução drástica no crescimento radicular, o que limita a capacidade da planta de absorver água e nutrientes minerais em camadas mais profundas do solo, agravando ainda mais os efeitos negativos da restrição hídrica frequentemente associada a ondas de calor. Essa deficiência nutricional e hídrica induzida compromete a sustentação estrutural do colmo e reduz a resistência da planta ao acamamento e a patógenos (Cunha; Caierão, 2023).

Portanto, a compreensão aprofundada dos impactos do estresse térmico exige uma análise detalhada e compartimentada de cada fase fenológica da cultura, visto que a sensibilidade da planta não é homogênea ao longo de todo o ciclo produtivo. Enquanto nas etapas iniciais o calor afeta principalmente o estabelecimento do estande e a arquitetura da planta, nas fases intermediárias e finais os prejuízos recaem diretamente sobre a fertilidade floral, o enchimento e o peso final dos grãos. A utilização rigorosa das escalas de Zadoks e de Feeks permite aos pesquisadores e agrônomos identificar com precisão o momento exato em que a lavoura foi submetida ao evento estressante, subsidiando o planejamento de estratégias de manejo, o zoneamento agrícola de risco climático e o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes ao calor (Cunha; Caierão, 2023).

Para contextualizar a evolução fenológica e compreender como os danos morfológicos são acompanhados ao longo do tempo, a escala de *Feeks-Large* organiza o ciclo do trigo em estádios numéricos que vão do afilhamento até a maturação completa. A Figura 1 ilustra detalhadamente cada uma dessas etapas, servindo de base para a identificação visual dos momentos de maior vulnerabilidade ao calor.

Figura 1 – Estádios fenológicos da escala Feeks 1940, modificada por Large 1954

Estádio	Escala Feeks-Large
	Afilhamento
1	Plantas recém-emergidas, com uma ou mais folhas.
2	Início do afilhamento.
3	Afilhos formados. Folhas enroladas em espiral. Algumas cultivares podem apresentar hábito prostrado.
4	Início do aparecimento do pseudocaule. Bainhas foliares começam a alongar-se.
5	Pseudocaule (formado por bainhas foliares) fortemente desenvolvido.
Estádio	Alongamento do colmo
6	Primeiro nó do colmo visível.
7	Segundo nó do colmo já formado.
8	Folha bandeira visível, mas ainda enrolada. Início do período de emborrachamento.
9	Lígula da folha bandeira já visível.
10	Bainha da folha bandeira completamente desenvolvida, mas as espigas ainda não são visíveis.
Estádio	Espigamento
10.1	Primeiras espigas recém-visíveis.
10.2	Um quarto do processo de espigamento completo.
10.3	Metade do processo de espigamento completo.
10.4	Três quartos do processo de espigamento completo.
10.5	Todas as espigas fora das bainhas.
Estádio	Florescimento
10.5.1	Início do florescimento.
10.5.2	Florescimento completo na parte apical da espiga.
10.5.3	Florescimento completo na parte basal da espiga.
10.5.4	Final do florescimento, grãos no estágio aquoso.
Estádio	Maturação
11	Grãos no estádio leitoso à maturação.
11.1	Grãos no estádio leitoso.
11.2	Grãos no estádio de massa (conteúdo macio e seco).
11.3	Grãos duros (difíceis de ser rompidos com a unha do polegar).
11.4	Maturação de colheita. Palhas secas.



Fonte: Cunha e Caierão, (2023); Montecelli et al., (2014).

Paralelamente à escala de Feeks, a escala decimal de Zadoks oferece um sistema numérico padronizado de dois dígitos, amplamente empregado na pesquisa e no campo para codificar com maior precisão microestágios fisiológicos específicos. A Figura 2 apresenta a descrição completa dessa classificação, permitindo correlacionar os eventos térmicos extremos a momentos precisos do desenvolvimento vegetal.

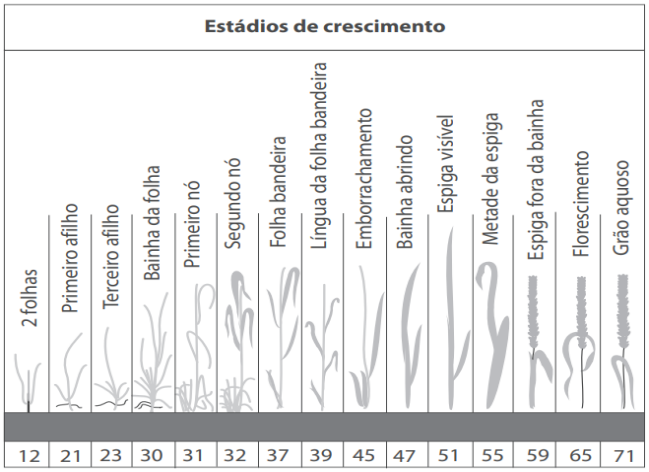
Figura 2 – Descrição dos estágios de crescimento da escala decimal de Zadoks

Escala decimal de Zadoks			
0	Germinação	1	Crescimento da plântula
00	Semente seca	10	1ª folha fora do coleóptilo
01	Início da embebição (absorção de água)	11	1ª folha desenrolada
02	-	12	2ª folha desenrolada
03	Embebição completa	13	3ª folha desenrolada
04	-	14	4ª folha desenrolada
05	Radícula (raiz) emergiu da cariopse (semente)	15	5ª folha desenrolada
06	-	16	6ª folha desenrolada
07	Coleóptilo	17	7ª folha desenrolada
08	-	18	8ª folha desenrolada
09	Primeira folha visível	19	9ª folha desenrolada
2	Afilhamento	3	Alongamento do colmo
20	Apenas afilho principal	30	Pseudocaule (bainha das folhas)
21	Afilho principal mais 1 afilho	31	1º nó detectável
22	Afilho principal mais 2 afilhos	32	2º nó detectável
23	Afilho principal mais 3 afilhos	33	3º nó detectável
24	Afilho principal mais 4 afilhos	34	4º nó detectável
25	Afilho principal mais 5 afilhos	35	5º nó detectável
26	Afilho principal mais 6 afilhos	36	6º nó detectável
27	Afilho principal mais 7 afilhos	37	Folha bandeira visível
28	Afilho principal mais 8 afilhos	38	-
29	Afilho principal mais 8 ou mais afilhos	39	Lígula da folha bandeira visível
4	Emborrachamento	5	Espigamento
40	-	50	-
41	Bainha da folha bandeira estendendo-se	51	Primeiras espiguetas da espiga visíveis
42	-	52	-
43	Início do emborrachamento	53	1/4 da espiga visível
44	-	54	-
45	Emborrachamento	55	1/2 da espiga visível
46	-	56	-
47	Abertura da bainha da folha bandeira	57	3/4 da espiga visível
48	-	58	-
49	Primeiras aristas visíveis	59	Surgimento da espiga
6	Florescimento	7	Grão leitoso
60	-	70	-
61	Início do florescimento	71	Grão com água
62	-	72	-
63	-	73	Grão pouco leite
64	-	74	-
65	Metade do florescimento	75	Grão médio leite
66	-	76	-
67	-	77	- Grão muito leite
68	-	78	-
69	Florescimento completo	79	-
8	Grão Pastoso	9	Maturação
80	-	90	-
81	-	91	Cariopse dura (difícil de dividir)
82	-	92	Cariopse rígida (não se consegue dividir)
83	Grão massa mole	93	Cariopse murchando
84	-	94	Mais madura palha seca
85	Grão massa média	95	Semente dormente
86	-	96	Germinação 50% viável
87	Grão massa dura	97	Sementes não dormentes
88	-	98	Dormência secundária induzida
89	-	99	Dormência secundária perdida

Fonte: Cunha e Caierão (2023).

A representação esquemática dos estádios de crescimento facilita a visualização prática das transformações morfológicas sofridas pela planta ao longo do tempo. A Figura 3 reúne graficamente os marcos da escala de Zadoks, destacando a transição sequencial desde as fases foliares até a formação do grão.

Figura 3 – Estádios do crescimento do trigo conforme escala de Zadocks de 1974



Fonte: Montecelli et al. (2014).

2.2.1 Fase vegetativa: emergência, perfilhamento e diferenciação do meristema

A fase vegetativa do trigo abrange os estádios iniciais de germinação, emergência de plântulas e perfilhamento, compreendendo as etapas fundamentais descritas nas escalas fenológicas. No início do ciclo, o processo de germinação da semente de trigo é caracterizado pela absorção rápida de água pelo grão seco e a reidratação dos tecidos embrionários, que ativa as enzimas essenciais para a retomada do metabolismo da semente, culminando na emissão da radícula e do coleóptilo. Quando ocorrem temperaturas excessivamente altas nesta etapa inicial, o vigor metabólico e a uniformidade da emergência no campo ficam comprometidos, gerando falhas graves no estande de plantas. O aquecimento excessivo do solo resseca a camada superficial de forma acelerada, dificultando o rompimento do coleóptilo e reduzindo a taxa de sobrevivência das plântulas recém-emergidas. Desse modo, o estresse térmico pré-emergente e pós-emergente inicial compromete a densidade populacional adequada por metro quadrado, fator estrutural que condiciona o teto produtivo da lavoura desde o seu início (Cunha; Caierão, 2023).

Com o avanço do desenvolvimento, a planta atinge o estádio de perfilhamento, período caracterizado pela emissão de brotações laterais a partir dos nós basais que definem o potencial de formação de espigas por área. O perfilhamento é um mecanismo morfológico de extrema relevância agronômica, pois confere à cultura a plasticidade necessária para compensar variações na população de plantas estabelecidas. Contudo, o estresse térmico durante esta fase altera profundamente o balanço hormonal interno, reduzindo a longevidade dos perfilhos viáveis e inibindo a ativação das gemas axilares. As altas temperaturas encurtam o intervalo de tempo em que o meristema apical permanece na fase vegetativa, fazendo com que a planta transite de forma precipitada para o alongamento do colmo antes de estruturar um número adequado de perfilhos férteis. Como resultado direto, a capacidade de suporte da cultura para a formação de fontes de reserva e drenos futuros fica severamente empobrecida (Alvarenga, 2021).

Além da redução quantitativa no número de perfilhos, o calor excessivo na fase vegetativa prejudica a expansão da área foliar total e a geometria do dossel agrícola. As folhas que se expandem sob estresse térmico tendem a apresentar menor superfície, menor espessura e taxas reduzidas de expansão celular, limitando a capacidade da planta de interceptar a radiação solar incidente. Essa restrição na área foliar verde diminui a capacidade fotossintética global da comunidade vegetal, prejudicando o acúmulo de reservas de carboidratos que deverão ser armazenados nos colmos para posterior remobilização (Alvarenga, 2021). A dinâmica de

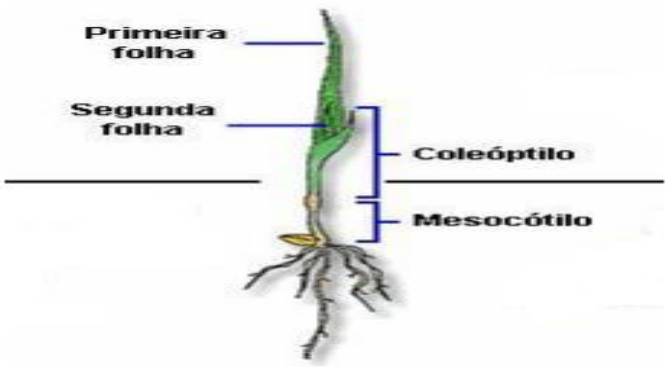
emissão de raízes também é desfavorecida, visto que temperaturas elevadas no solo desestimulam o crescimento do sistema radicular em profundidade, tornando a lavoura altamente vulnerável a oscilações hídricas subsequentes (Cunha; Caierão, 2023).

A diferenciação do meristema apical, que marca a transição entre o perfilhamento e a fase reprodutiva interna, representa um dos marcos mais sensíveis do ciclo vegetativo do trigo. Sob condições térmicas estressantes, a velocidade de diferenciação celular no ápice caulinar é alterada de maneira desarmônica, o que pode resultar na definição precoce de um menor número de primórdios florais na futura espiga. Esse processo é crítico porque define o potencial máximo de espiguetas por espiga, componente de rendimento que possui baixa capacidade de compensação em estádios posteriores do ciclo. O encurtamento drástico da fase vegetativa provocado pelo calor impede que a planta expresse plenamente sua capacidade genética de estruturação produtiva, consolidando perdas irreversíveis antes mesmo da emissão visível das espigas (Rissi, 2022).

Portanto, o manejo adequado e a monitoria constante por meio das escalas de Zadoks durante a fase vegetativa são indispensáveis para identificar janelas de vulnerabilidade e adotar práticas mitigadoras, como o manejo nutricional equilibrado e a irrigação suplementar quando disponível. A proteção da cultura contra o estresse térmico nesta etapa assegura a formação de um estande vigoroso, um perfilhamento adequado e uma diferenciação meristemática robusta, pilares fundamentais para que a planta suporte as demandas energéticas das fases reprodutivas e de enchimento de grãos (Rissi, 2022; Alvarenga, 2021).

Nesta fase de estabelecimento inicial, a morfologia da jovem plântula é crucial para o enraizamento e sustentação. A Figura 4 apresenta a estrutura morfológica de uma plântula de trigo recém-emergida, evidenciando o coleóptilo, o mesocótilo e o sistema radicular primordial, vulneráveis ao aquecimento do solo.

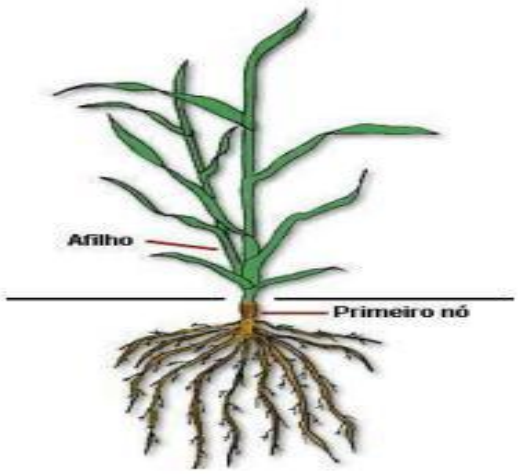
Figura 4 – Plântula de trigo



Fonte: Marchioro (2022).

A diferenciação das ramificações basais constitui o pilar para o adensamento adequado da cultura. A Figura 5 ilustra a arquitetura morfológica do afilhamento do trigo, destacando a inserção dos afilhos e a estrutura nodal sob a superfície do solo.

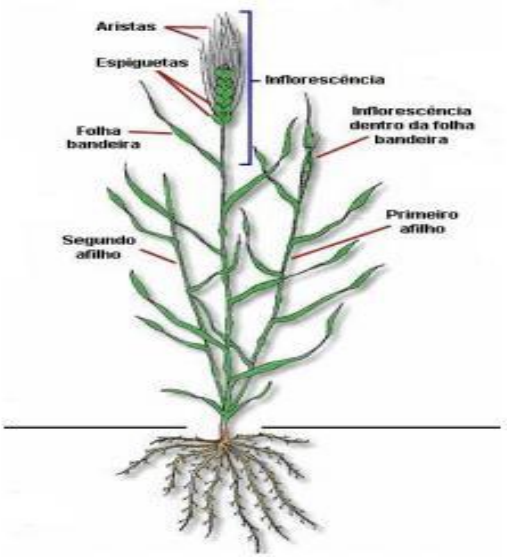
Figura 5 – Afilhamento do trigo



Fonte: Marchioro (2022).

À medida que o meristema se diferencia e os internódios se distendem, a planta avança para o estágio de extensão caulinar. A Figura 6 exemplifica a fase de alongamento do trigo, demonstrando o posicionamento da folha bandeira e a elevação da inflorescência jovem no interior do pseudocaule.

Figura 6 – Alongamento do trigo



Fonte: Marchioro (2022).

2.2.2 Fase reprodutiva: emborrachamento, antese e fertilização

A fase reprodutiva do trigo representa o período de maior sensibilidade fisiológica da cultura ao estresse abiótico, englobando o alongamento dos entrenós, o espigamento e a antese. Durante o alongamento e o espigamento, as estruturas florais internas encontram-se em pleno processo de diferenciação meiótica e organogênese, tornando-se altamente vulneráveis a flutuações térmicas extremas. O estresse térmico nessa janela temporal compromete a divisão celular nos tecidos em formação, provocando anomalias estruturais nas anteras e nos ovários. As altas temperaturas interferem diretamente na microsporogênese, processo no qual são gerados os grãos de pólen, resultando em desidratação prematura das células reprodutivas masculinas e perda expressiva de sua viabilidade germinativa antes mesmo da polinização. Consequentemente, a capacidade reprodutiva da planta fica comprometida logo nas etapas antecedentes à fecundação efetiva (Alvarenga, 2021).

No estádio de emborrachamento momento em que o colmo atinge seu último entrenó e a bainha da folha bandeira se espessa para abrigar a espiga jovem, o calor excessivo restringe a expansão celular e debilita o desenvolvimento morfológico interno. A folha bandeira, principal fonte fotossintética responsável por fornecer assimilados para a espiga em desenvolvimento, pode sofrer danos oxidativos severos caso o estresse térmico coincida com restrição hídrica do solo. O intumescimento característico do emborrachamento exige um aporte energético elevado, que fica limitado pela redução da taxa fotossintética líquida imposta pelo fechamento estomático. Como resultado, a espiga emerge com menor vigor estrutural, apresentando espiguetas basais e apicais subdesenvolvidas que não completam sua formação floral de maneira adequada (Rissi, 2022).

Posteriormente, nos eventos de antese e fertilização, as temperaturas elevadas afetam de maneira drástica a deiscência das anteras e a receptividade dos estigmas, provocando falhas severas na fecundação dos óvulos. Temperaturas diurnas que superam os limites toleráveis da espécie durante a antese causam a esterilidade do pólen e prejudicam a formação do tubo polínico, o qual necessita de condições termo hídricas estáveis para crescer através do estilete até alcançar o ovário (Alvarenga, 2021). Quando o tubo polínico paralisa seu crescimento devido ao calor, a fertilização não se concretiza, impedindo a transformação da flor em cariopse (Rissi, 2022). Esse distúrbio fisiológico é a principal causa do fenômeno de espigas chochas ou com falhas parciais de grãos, reduzindo drasticamente o número de grãos por espiga, componente de altíssima correlação com a produtividade final de grãos (Cunha; Caierão, 2023).

Além da esterilidade masculina e dos problemas na fertilização, o estresse térmico na fase reprodutiva acelera o desenvolvimento fenológico de forma desproporcional, reduzindo a duração da antese e comprimindo o período em que a polinização pode ocorrer com sucesso. Em condições normais, a antese distribui-se ao longo de vários dias na espiga, garantindo maior segurança contra oscilações climáticas pontuais; contudo, o calor extremo sincroniza e abrevia esse processo, expondo toda a população floral a uma única janela de risco severo. Essa compressão temporal impede que flores secundárias ou tardias da espiga sejam polinizadas caso a onda de calor coincida com o pico de abertura floral. O impacto combinado dessas injúrias reprodutivas resulta em quebras acentuadas na produtividade que não podem ser recuperadas nas fases subsequentes do ciclo da cultura (Rissi, 2022).

Portanto, a fase reprodutiva constitui o gargalo crítico para a estabilidade de rendimento da cultura do trigo sob cenários de aquecimento global ou flutuações térmicas sazonais (Alvarenga, 2021). A identificação precisa dos estádios de emborrachamento e antese por meio da escala de Zadoks é fundamental para o planejamento agronômico, permitindo evitar que o ciclo da cultivar coincida com períodos históricos de altas temperaturas na região de cultivo (Cunha; Caierão, 2023). Estratégias de melhoramento genético, voltadas para a tolerância ao calor na antese e o uso de práticas de manejo que amenizem o estresse térmico local são essenciais para salvaguardar a fertilidade floral e garantir a formação adequada dos grãos (Rissi, 2022; Alvarenga, 2021).

2.2.3 Fase de enchimento e maturação dos grãos

A fase de enchimento e maturação dos grãos constitui a etapa final do ciclo da cultura do trigo, sendo caracterizada nas escalas fenológicas pelos subestádios de grãos leitosos, grãos em massa e maturação fisiológica (Rissi, 2022). Neste momento, a prioridade metabólica da planta consiste na remobilização de compostos nitrogenados e carbonados previamente armazenados nos órgãos vegetativos, bem como na assimilação de foto assimilados correntes para o interior da cariopse (Alvarenga, 2021). Esse processo de deposição de amido e proteínas determina diretamente o peso hectolítrico, o tamanho e a densidade final dos grãos. Contudo, a incidência de altas temperaturas durante esta fase acelera drasticamente a senescência dos tecidos verdes, reduzindo a vida útil e a eficiência fotossintética da folha bandeira, que atua como a principal fonte produtora de assimilados para os drenos em desenvolvimento (Rissi, 2022).

O estresse térmico durante o enchimento dos grãos encurta de maneira expressiva a duração desta fase fenológica, limitando o tempo efetivo em que a cariopse permanece acumulando matéria seca. Sob temperaturas elevadas, a taxa de divisão celular no endosperma do grão é desregulada e a síntese de amido é interrompida de forma prematura. Como consequência direta dessa restrição temporal e metabólica, os grãos não conseguem expandir-se totalmente nem atingir o seu volume máximo potencial, resultando em cariopses visivelmente menores, enrugadas e leves, esse fenômeno reduz drasticamente o peso de mil grãos, impactando de forma negativa e direta a produtividade total de grãos colhidos por hectare (Alvarenga, 2021).

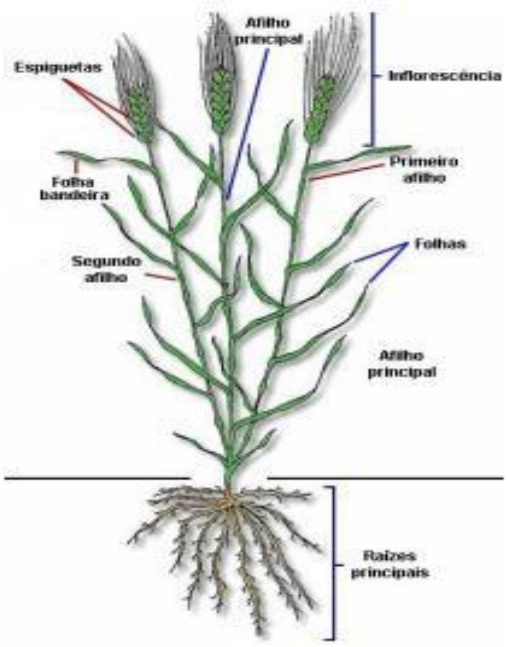
Além dos prejuízos quantitativos, o estresse térmico na fase de enchimento compromete severamente a qualidade industrial e tecnológica do trigo produzido. As altas temperaturas alteram a composição proteica do grão, modificando a proporção entre as frações de gliadinas e gluteninas, o que afeta diretamente a força geral de glúten e a elasticidade da massa destinada à panificação. Grãos desenvolvidos sob calor excessivo tendem a apresentar maior proporção de grãos cachos e farinhentos, com menor teor de proteína útil e propriedades reológicas inferiores, desvalorizando o produto no mercado comercial. A desnaturação parcial de proteínas de reserva sob condições de estresse térmico severo reduz o valor de wet gluten e compromete a qualidade comercial exigida pelos moinhos (Cunha; Caierão, 2023).

Na etapa final de maturação e dessecação, codificada pelos estádios avançados da escala de Zadoks, o calor promove uma perda de água desregulada e excessivamente rápida nos tecidos da espiga e dos grãos. Essa desidratação forçada impede que ocorra a maturação fisiológica plena de forma homogênea em toda a lavoura, gerando lotes de colheita com alta porcentagem de grãos danificados e quebradiços. Além disso, a maturação desuniforme induzida por ondas de calor tardias eleva o risco de pré-brotação na espiga caso ocorram precipitações logo após a maturidade, depreciando ainda mais a sanidade e a integridade comercial do lote colhido. O controle e o monitoramento rigoroso desta fase final tornam-se, portanto, vitais para definir o ponto exato de colheita e mitigar perdas qualitativas adicionais (Rissi, 2022).

Em suma, a fase de enchimento e maturação representa a última oportunidade da cultura para consolidar seu rendimento produtivo e sua qualidade industrial, sendo extremamente vulnerável a episódios de estresse térmico. A compreensão de que o encurtamento do ciclo de enchimento provocado pelo calor reduz o peso e a densidade dos grãos reforça a importância de estratégias agronômicas preventivas, como a escolha de épocas de semeadura que evitem o florescimento e a maturação nos meses mais quentes do ano. O uso integrado das escalas

fenológicas permite mapear com precisão esses riscos climáticos, garantindo maior estabilidade de produção e preservação da qualidade tecnológica do trigo comercializado (RISSI, 2022; Alvarenga, 2021).

Figura 7 – Maturação do trigo



Fonte: Marchioro (2022).

2.2.4 Incidência de fitopatógenos e doenças associadas ao aumento de temperatura e à umidade

A alteração no padrão de temperaturas e o aumento de eventos térmicos extremos modificam significativamente a dinâmica epidêmica das principais doenças fúngicas da triticultura. O estresse térmico fragiliza as barreiras fisiológicas de defesa da planta, enquanto o ambiente aquecido especialmente quando associado ao molhamento foliar ou à alta umidade relativa acelera a germinação de esporos, reduz o período latente dos patógenos e aumenta a taxa de infecção no campo (Embrapa, 2020b). Entre as enfermidades beneficiadas por essas condições, destacam-se a giberela, a brusone do trigo e o complexo de manchas foliares.

A giberela (*Fusarium graminearum*), uma das doenças mais devastadoras da cultura, encontra condições ideais para surtos epidêmicos quando ocorrem temperaturas elevadas (especialmente na faixa de 20 °C a 25 °C ou superiores) combinadas a períodos prolongados de chuva e alta umidade durante a antese (Embrapa, 2020b). O fungo infecta a espiga através das anteras expostas, provocando o branqueamento prematuro de espiguetas, a paralisia no enchimento e a formação de grãos arroxados ou esbranquiçados e chochos. Além da perda direta

de produtividade, a giberela resulta no acúmulo de micotoxinas nocivas, como o deoxinivalenol (DON), inviabilizando o lote de grãos para o consumo humano e animal.

Paralelamente à giberela, a brusone do trigo (*Magnaporthe oryzae* Triticum) é severamente favorecida por temperaturas altas (acima de 24 °C) e alta umidade, promovendo o estrangulamento da raque da espiga e o branqueamento total da porção superior à infecção (Embrapa, 2024). Do mesmo modo, as manchas foliares como a mancha-amarela (*Pyrenophora tritici-repentis*) e a mancha-marrom (*Bipolaris sorokiniana*) têm seus ciclos infecciosos encurtados pelo calor, acelerando a expansão das lesões e promovendo a desfolha precoce do dossel. A ação conjunta dessas enfermidades sob temperaturas elevadas reduz drasticamente a área foliar sadia e potencializa as perdas de rendimento impostas pelo estresse térmico.

2.3 Exigências térmicas e temperaturas críticas do trigo

A temperatura é um dos principais fatores ambientais que influenciam o desenvolvimento da cultura do trigo, pois interfere diretamente na velocidade de crescimento, na duração das fases fenológicas e na formação dos componentes de produtividade. O trigo apresenta diferentes respostas à temperatura ao longo do ciclo, sendo que cada processo fisiológico possui limites mínimos, ótimos e máximos para seu desenvolvimento. Esses limites são conhecidos como temperaturas cardinais e ajudam a compreender por que o aumento da temperatura pode acelerar o ciclo da cultura e, em determinadas situações, provocar perdas de produtividade (Porter; Gawith, 1999).

Em condições adequadas, temperaturas moderadas favorecem o crescimento e o desenvolvimento do trigo. Entretanto, quando os valores se elevam acima das condições consideradas favoráveis, a velocidade dos processos fisiológicos pode aumentar de forma excessiva. Como consequência, ocorre redução do período disponível para a formação de folhas, perfilhos e estruturas reprodutivas. De acordo com a resposta da cultura à temperatura, que não é igual em todas as fases, sendo necessário considerar o estágio de desenvolvimento em que ocorre o estresse térmico (Porter; Gawith,1999).

Durante a fase vegetativa, temperaturas elevadas podem acelerar o desenvolvimento da planta e antecipar a passagem de uma fase fenológica para outra. Embora a aceleração do ciclo possa parecer positiva em determinadas situações, ela pode reduzir o tempo necessário para o acúmulo de biomassa e para a formação de estruturas que posteriormente contribuirão para a produtividade. Assim, temperaturas acima das condições adequadas podem resultar em menor

desenvolvimento vegetativo e menor capacidade da planta de suportar períodos posteriores de estresse (Porter; Gawith,1999).

Na fase reprodutiva, a temperatura passa a exercer influência ainda mais importante, principalmente durante a formação das estruturas florais, antese e fertilização. O excesso de calor pode prejudicar a viabilidade do pólen e interferir na fecundação, reduzindo a formação de grãos. Dessa forma, a ocorrência de temperaturas elevadas próximas à floração representa um risco importante para o estabelecimento do potencial produtivo da cultura (Porter; Gawith,1999).

O enchimento dos grãos também apresenta elevada sensibilidade ao calor. Temperaturas elevadas após a antese aceleram a maturação e reduzem a duração do período de enchimento. Com menos tempo para acumular matéria seca, os grãos tendem a apresentar menor massa e podem apresentar alterações em características físicas e químicas. Revisões recentes indicam que o período de enchimento é uma das fases mais sensíveis aos efeitos negativos do estresse térmico sobre a qualidade do trigo (Liu *et al*., 2026).

No Brasil, a importância das temperaturas críticas também é considerada nos estudos de zoneamento agrícola. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) utiliza informações de temperatura, solo, ciclo das cultivares e fases fenológicas para determinar períodos mais adequados para a semeadura. Em determinadas regiões, critérios relacionados à temperatura durante a floração são utilizados para reduzir o risco climático da produção (BRASIL, 2017).

Portanto, não é suficiente avaliar apenas a temperatura média durante todo o ciclo do trigo. É necessário considerar a intensidade, a duração e o momento em que ocorre o aumento da temperatura. Um mesmo valor térmico pode apresentar consequências diferentes dependendo da fase fenológica da planta. Essa relação entre temperatura e desenvolvimento demonstra a importância de conhecer as exigências térmicas da cultura para definir cultivares e épocas de semeadura mais adequadas às condições de cada região (ZARC, BRASIL, 2017).

2.4 Impactos das altas temperaturas na produtividade e qualidade dos grãos

As altas temperaturas podem provocar alterações importantes nos componentes de produtividade do trigo. Entre os principais componentes estão o número de espigas por área, o número de grãos por espiga e a massa dos grãos. O estresse térmico pode interferir em um ou mais desses componentes, fazendo com que o potencial produtivo da cultura seja reduzido. A intensidade da perda depende da temperatura atingida, do tempo de exposição e da fase de desenvolvimento em que ocorre o estresse.

Durante o período reprodutivo, temperaturas elevadas podem diminuir a fertilidade das flores e reduzir o número de grãos formados. Quando o estresse ocorre após a antese, os efeitos estão principalmente relacionados à redução da duração do enchimento dos grãos. O calor acelera a senescência das folhas, reduz a atividade fotossintética e altera processos relacionados ao transporte e armazenamento de assimilados nos grãos. Como resultado, pode ocorrer redução da massa de mil grãos e da produtividade final (Farooq *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2026).

O peso dos grãos é particularmente afetado quando temperaturas elevadas ocorrem durante o enchimento. Uma revisão global publicada por (Liu et al. 2026), envolvendo 95 estudos e 1.976 observações, verificou redução média de 12,7% na massa de mil grãos sob estresse térmico. O mesmo estudo identificou redução no conteúdo de amido, demonstrando que o calor não interfere somente na quantidade produzida, mas também na composição do grão.

A cultura do trigo (*Triticum aestivum*) apresenta alta sensibilidade às oscilações térmicas, de modo que a ocorrência de temperaturas elevadas atua como um fator limitante para o pleno desenvolvimento da cultura. Quando o estresse térmico ocorre em fases fenológicas cruciais, como o perfilhamento e o espigamento, há uma aceleração forçada do ciclo biológico da planta. Esse fenômeno reduz o período disponível para a fotossíntese e para a absorção de nutrientes, resultando em uma menor área foliar e comprometendo diretamente a formação dos componentes de rendimento da lavoura (Conab, 2026).

De acordo com o Boletim de Monitoramento dos Cultivos de Verão e Inverno da Companhia Nacional de Abastecimento (2026), as análises agrometeorológicas e os índices de vegetação obtidos via sensoriamento remoto comprovam o impacto do calor sobre a fisiologia vegetal. O monitoramento das principais regiões produtoras evidencia que a persistência de dias com temperaturas acima da média histórica provoca um desgaste metabólico severo nas plantas de trigo, encurtando a fase de enchimento de grãos e antecipando a maturação de forma prejudicial (Conab, 2026).

As consequências físicas do estresse por calor nas lavouras manifestam-se de forma direta na morfologia dos grãos colhidos. Sob condições de estresse térmico prolongado, a planta sofre restrições na translocação de fotoassimilados para as espigas, culminando na produção de grãos chochos, de menor peso específico e com qualidade industrial de farinha depreciada. Assim, o clima atua não apenas na redução do volume biológico, mas compromete as exigências tecnológicas demandadas pelos moinhos (Conab, 2026).

Esse cenário de estresse fisiológico reflete-se matematicamente nos relatórios estatísticos de safra nacional. O decréscimo acentuado na produtividade média por hectare é

frequentemente associado a esses episódios de extremos climáticos durante os meses de inverno e primavera. Na estimativa consolidada pelo 11º Levantamento da Safra de Grãos (Conab, 2026), observa-se que as quebras de rendimento nas principais regiões triticultoras do país são justificadas pela impossibilidade de a cultura expressar seu potencial genético ideal devido às adversidades térmicas.

Em suma, a mitigação dos impactos causados pelas altas temperaturas configura-se como um dos maiores desafios para a sustentabilidade da triticultura brasileira. Compreender a correlação entre as anomalias de temperatura registradas nos boletins de monitoramento e a oscilação nos dados finais de produtividade apresentados pela (Conab, 2026) torna-se indispensável. Esse diagnóstico técnico fundamenta a necessidade de investimentos em zoneamento agrícola assertivo, práticas de manejo conservacionista e no desenvolvimento de cultivares geneticamente mais tolerantes ao calor.

Além do rendimento, a qualidade física dos grãos avaliada principalmente pelo peso hectolítrico é severamente impactada pelas condições térmicas ambientais. O estresse térmico durante o enchimento, reduz o tempo de deposição de reservas no endosperma, culminando em grãos de reduzida densidade e tamanho. Essa alteração física reduz o rendimento de extração de farinha na moagem, demonstrando que variações de temperatura podem depreciar o valor comercial da safra independentemente de haver impacto expressivo sobre o volume produzido (Guarienti *et al.*, 2005).

As altas temperaturas também interferem na composição química dos grãos, especialmente na relação entre amido e proteínas. O calor pode reduzir o acúmulo de amido enquanto aumenta a concentração relativa de proteínas. Isso ocorre porque o estresse térmico altera o metabolismo do grão e reduz a capacidade de deposição de carboidratos durante o enchimento (Blumenthal; Barlow; Wrigley, 1993).

Entretanto, o aumento do teor de proteína não significa necessariamente melhoria da qualidade tecnológica. O estresse térmico pode modificar a composição das proteínas do glúten, principalmente a relação entre gluteninas e gliadinas. Essas alterações podem diminuir a força da massa e modificar características importantes para a fabricação de farinha e produtos de panificação. Estudos recentes confirmam que temperaturas elevadas podem alterar a relação entre esses componentes e comprometer algumas propriedades de processamento (Liu *et al.*, 2026).

Dessa forma, os efeitos das altas temperaturas devem ser avaliados tanto pela produtividade quanto pela qualidade dos grãos. A redução da massa dos grãos, do amido e de

determinadas características tecnológicas pode gerar prejuízos econômicos mesmo quando a lavoura ainda apresenta produção considerada satisfatória. Por esse motivo, a tolerância ao calor deve ser considerada não apenas em relação à quantidade de grãos produzida, mas também à manutenção da qualidade necessária para sua utilização industrial.

2.5 Estratégias de manejo e utilização de cultivares tolerantes ao calor

Diante da possibilidade de ocorrência mais frequente de temperaturas elevadas, a adoção de estratégias de manejo torna-se importante para reduzir os impactos do estresse térmico sobre o trigo. Entre as principais medidas estão a escolha adequada da época de semeadura, a utilização de cultivares adaptadas às condições locais, o manejo da disponibilidade de água e a utilização de informações climáticas para o planejamento da lavoura.

A escolha da época de semeadura é uma das estratégias mais importantes porque permite posicionar as fases mais sensíveis da cultura em períodos de menor risco climático. Quando a semeadura é realizada de forma adequada, busca-se evitar que a floração e o enchimento dos grãos coincidam com períodos de temperaturas excessivamente elevadas. No Brasil, essa estratégia é considerada pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático, que indica períodos de semeadura de acordo com as características climáticas, o solo e o ciclo das cultivares (Brasil, 2017).

O zoneamento é especialmente importante porque as condições climáticas variam entre as regiões produtoras. Estudos realizados para a região Sul do Brasil demonstraram que cenários de aumento da temperatura podem reduzir o número de períodos considerados adequados para a semeadura do trigo, sendo o Paraná uma das regiões com possibilidade de redução da área potencial de cultivo em cenários futuros (Santi *et al.*, 2017).

A escolha da cultivar também apresenta grande importância. As cultivares não apresentam a mesma resposta ao calor, pois existem diferenças genéticas relacionadas à duração do enchimento de grãos, capacidade fotossintética, manutenção das folhas verdes, estabilidade das membranas celulares e capacidade antioxidante. Dessa forma, a utilização de materiais geneticamente mais tolerantes pode contribuir para reduzir as perdas provocadas por períodos de temperaturas elevadas (Sarkar *et al.*, 2021).

A tolerância ao calor é uma característica complexa e está relacionada a diferentes mecanismos fisiológicos e bioquímicos. Entre as características associadas à maior tolerância estão a manutenção da atividade fotossintética, menor aceleração da senescência foliar, capacidade de manter o enchimento dos grãos e maior estabilidade das estruturas celulares. Por

isso, os programas de melhoramento buscam reunir diferentes características de tolerância em uma mesma cultivar (Sarkar *et al*., 2021).

A disponibilidade adequada de água também pode contribuir para reduzir os efeitos do calor. O estresse térmico frequentemente ocorre junto com condições de déficit hídrico, aumentando os danos à planta. A manutenção de umidade adequada no solo permite que a planta continue realizando suas funções fisiológicas e pode ajudar na regulação da temperatura do dossel. Entretanto, a irrigação deve ser utilizada de acordo com as características da região, do solo e da cultura, evitando desperdício de água (Akmal; Alotaibi, 2021).

Outra estratégia importante é o acompanhamento das condições climáticas durante o desenvolvimento da lavoura. A utilização de previsões meteorológicas, histórico climático e informações de zoneamento pode auxiliar o produtor na tomada de decisões relacionadas à época de semeadura e ao manejo da cultura. O ZARC tem justamente a finalidade de disponibilizar informações que permitam identificar períodos de menor risco para diferentes culturas e regiões (Brasil, 2017).

Portanto, não existe uma única medida capaz de eliminar os efeitos das altas temperaturas. A adaptação da produção depende da combinação entre genética, manejo e planejamento climático. A utilização de cultivares tolerantes, associada à escolha adequada da época de semeadura e ao manejo correto da água e dos demais recursos da lavoura, pode contribuir para aumentar a estabilidade produtiva do trigo diante do aumento das temperaturas (Embrapa, 2026a).

2.6 Perspectivas para a produção de trigo no Brasil diante do aumento das temperaturas

As mudanças nas condições climáticas representam um dos principais desafios para a produção de trigo nas próximas décadas. Por apresentar elevada sensibilidade à temperatura, a cultura pode sofrer alterações na duração do ciclo, na formação dos componentes de produtividade e na qualidade dos grãos. Dessa maneira, o aumento das temperaturas pode modificar a distribuição das áreas consideradas adequadas ao cultivo e exigir novas estratégias de adaptação (Teixeira, 2020).

No Brasil, essa preocupação é ainda mais importante devido à grande diversidade climática existente entre as regiões produtoras. O trigo é cultivado tanto em regiões de clima subtropical, principalmente no Sul, quanto em áreas de clima mais quente, como algumas regiões do Cerrado. Essa expansão para diferentes ambientes depende da disponibilidade de

cultivares adaptadas e do uso de práticas de manejo capazes de reduzir os riscos associados às condições climáticas (Pereira *et al.*, 2024).

Estudos de zoneamento climático indicam que o aumento das temperaturas pode reduzir as janelas consideradas adequadas para a semeadura do trigo em parte da região Sul. Santi *et al.* (2017) verificaram, por meio de cenários climáticos futuros, que a temperatura seria um dos principais fatores responsáveis pela redução do número de períodos aptos à semeadura, com impactos importantes principalmente no Paraná.

Esse cenário demonstra que a produção de trigo poderá depender cada vez mais da capacidade de adaptação às novas condições ambientais. A alteração das épocas de semeadura, a utilização de cultivares de ciclo e características adequadas, o desenvolvimento de materiais tolerantes ao calor e o aperfeiçoamento das práticas de manejo podem ser importantes para manter a produção em regiões que apresentem aumento das temperaturas (Embrapa, 2026b).

Além das estratégias utilizadas diretamente na propriedade, o melhoramento genético apresenta papel fundamental. O desenvolvimento de cultivares capazes de manter produtividade e qualidade sob temperaturas elevadas pode permitir que a cultura continue sendo produzida em regiões que apresentem maior ocorrência de eventos de calor. Pesquisas recentes destacam que a combinação de métodos fisiológicos, genéticos, moleculares e agronômicos é necessária para aumentar a tolerância do trigo ao estresse térmico (Sarkar *et al.*, 2021).

O planejamento da produção também deverá considerar cada vez mais as informações climáticas. No Brasil, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático constitui uma ferramenta importante para orientar a escolha da época de semeadura e reduzir os riscos relacionados às condições ambientais. A utilização dessas informações, acompanhado de dados locais de temperatura e precipitação, pode melhorar a tomada de decisão e contribuir para maior estabilidade da produção (Brasil, 2017).

Dessa forma, o futuro da triticultura brasileira dependerá da capacidade de adaptação da cultura às mudanças ambientais. O aumento das temperaturas não significa necessariamente a inviabilidade do cultivo, mas exige maior planejamento, desenvolvimento de cultivares adaptadas e utilização de práticas agrícolas adequadas. A integração entre melhoramento genético, manejo, zoneamento climático e acompanhamento das condições meteorológicas tende a ser fundamental para manter a produtividade e a qualidade do trigo em um cenário de temperaturas mais elevadas (Embrapa, 2026b).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, adota-se a abordagem da revisão integrativa da literatura, de caráter qualitativo, cuja proposta é reunir, sistematizar e avaliar criticamente diferentes abordagens e achados científicos sobre os impactos das altas temperaturas no desenvolvimento e na produtividade da cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.). A escolha por este tipo de revisão justifica-se por sua capacidade de sintetizar a literatura existente, proporcionando uma compreensão abrangente do tema e permitindo evidenciar eventuais lacunas no conhecimento científico. O recorte temporal contempla publicações no período de 1969 a 2026, nos idiomas português e inglês.

A definição dos critérios de busca e a seleção das fontes foram estruturadas para garantir o alinhamento com a proposta da pesquisa. O levantamento bibliográfico é realizado em bases de dados reconhecidas na comunidade acadêmica, como Periódicos CAPES, SciELO e Google Scholar, além da consulta a documentos e boletins técnicos divulgados por instituições de pesquisa agrícola, com destaque para a Embrapa. Adicionalmente, a investigação contempla o uso de livros acadêmicos e capítulos de livros especializados nas áreas de ecofisiologia vegetal, agrometeorologia e fitopatologia. As buscas são efetuadas mediante o emprego de descritores e palavras-chave específicas, tais como: "trigo", "estresse térmico", "altas temperaturas", "produtividade", "giberela" e "manejo".

Para assegurar a confiabilidade do estudo, foram estabelecidos critérios claros de inclusão e exclusão de fontes. São incluídos artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares, livros, teses, dissertações e documentos técnicos que abordem diretamente os efeitos das temperaturas elevadas sobre o trigo, dentro do recorte temporal e idiomático estabelecido. Em contrapartida, são excluídos trabalhos sem rigor metodológico, resumos expandidos de eventos sem o texto completo e publicações que não apresentem relação direta com o problema e os objetivos investigados.

A análise e interpretação dos textos selecionados ocorrem de forma transparente e estruturada. Os dados extraídos são organizados em uma planilha padronizada contendo informações relativas a autor, ano de publicação, objetivo, metodologia empregada, principais resultados e conclusões. Em seguida, emprega-se a análise temática para categorizar os achados em eixos norteadores: os efeitos do calor nas fases vegetativa, reprodutiva e de enchimento de grãos; os impactos na produtividade e qualidade tecnológica; a ocorrência de fitopatógenos e

doenças associadas às altas temperaturas e umidade (com ênfase na giberela, brusone e manchas foliares); e as estratégias de manejo e seleção de cultivares adaptadas ao estresse térmico.

Por tratar-se exclusivamente de uma pesquisa bibliográfica, não há envolvimento ou intervenção com seres humanos, dispensando a submissão a um Comitê de Ética em Pesquisa. Contudo, respeitam-se rigorosamente os princípios éticos relacionados à propriedade intelectual e à citação adequada de todas as fontes consultadas. Com objetividade e clareza, o registro preciso de todos os procedimentos metodológicos garante a transparência e a reprodutibilidade da pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise integrativa da literatura permitiu consolidar um panorama abrangente sobre as respostas da cultura do trigo (*Triticum aestivum L.*) frente à incidência de altas temperaturas e episódios de estresse térmico no Brasil. O corpus bibliográfico analisado demonstra convergência entre diferentes autores ao apontar que o calor excessivo atua como um fator estressante multifatorial, cujos prejuízos variam em intensidade de acordo com a fase fenológica em que a planta se encontra exposta.

4.1 Impactos do estresse térmico nas fases de desenvolvimento

Os estudos revisados evidenciam que a fase vegetativa, embora menos crítica que a reprodutiva, sofre impactos expressivos com o aumento térmico. O aquecimento acentuado do solo e do ar acelera a taxa de desenvolvimento da planta, reduzindo o período de perfilhamento e limitando a emissão de perfilhos férteis. Conforme apontam Cunha e Caierão (2023), essa aceleração forçada comprime a área foliar verde e restringe o acúmulo inicial de biomassa e reservas nos colmos.

Contudo, é na fase reprodutiva que os danos se tornam mais severos e irreversíveis. Durante o emborrachamento e a antese, temperaturas diurnas elevadas comprometem a microsporogênese, provocando a esterilidade do pólen e falhas estruturais na formação do tubo polínico. Esse distúrbio fisiológico impede a fertilização plena dos óvulos, explicando o fenômeno de espigas chochas e a drástica redução no número de grãos por espiga, componente de forte correlação com o teto produtivo (Alvarenga, 2021; Rissi, 2022).

Na etapa final de enchimento e maturação dos grãos, o estresse térmico encurta a janela em que a cariopse permanece acumulando fotoassimilados. Dados consolidados em revisões globais recentes, como o estudo de Liu *et al.* (2026), demonstram reduções médias expressivas

na massa de mil grãos e no conteúdo de amido sob condições de calor contínuo. Essa maturação forçada gera grãos leves, enrugados e de menor densidade, o que compromete o peso hectolítrico e deprecia o rendimento industrial de farinhas exigido pelos moinhos (Guarienti *et al.*, 2005; Conab, 2026).

4.2 Dinâmica fitossanitária sob influência térmica

Além dos danos fisiológicos diretos, a literatura demonstra que o aumento da temperatura, quando associado a períodos de alta umidade relativa e molhamento foliar, altera de maneira drástica o perfil fitossanitário das lavouras de trigo (Embrapa, 2020b). Condições térmicas na faixa de 20 °C a 25 °C ou superiores durante a antese favorecem surtos epidêmicos de giberela (*Fusarium graminearum*), que infecta as espigas e contamina os grãos com micotoxinas nocivas, como o deoxinivalenol (DON). Da mesma forma, a brusone (*Magnaporthe oryzae t. Triticum*) encontra em ambientes quentes e úmidos o cenário ideal para o rápido estrangulamento da raque e o branqueamento da espiga, somando-se à ação das manchas foliares na destruição precoce do dossel fotossintético (Embrapa, 2024).

4.3 Estratégias de mitigação e manejo

Diante do cenário de vulnerabilidade climática, os autores convergem ao destacar que a mitigação dos impactos térmicos exige a adoção de um conjunto integrado de práticas agronômicas. Entre as principais recomendações, destaca-se a rigorosa observância ao ZARC para o planejamento da época de semeadura, garantindo que as fases sensíveis da cultivar (como a floração e o enchimento) não coincidam com os picos históricos de calor na região (Brasil, 2017).

Paralelamente, o uso de cultivares geneticamente tolerantes ao calor e capazes de manter a estabilidade das membranas celulares, a eficiência fotossintética e a atividade antioxidante sob estresse, figuram como a ferramenta biológica mais sustentável para a manutenção da produtividade e da qualidade tecnológica do trigo nas regiões tradicionais e nas áreas de expansão no Brasil (Sarkar *et al.*, 2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve por objetivo analisar, por meio de uma revisão integrativa da literatura, os impactos das altas temperaturas sobre o desenvolvimento, os componentes de rendimento e

a produtividade da cultura do trigo no Brasil, identificando as fases de maior vulnerabilidade, as consequências fitossanitárias e as estratégias de manejo e melhoramento genético aplicáveis.

A partir da sistematização das fontes bibliográficas, constatou-se que o estresse térmico afeta negativamente todas as etapas do ciclo biológico do trigo (*Triticum aestivum* L.). Na fase vegetativa, o calor acelera o desenvolvimento e limita a área foliar e o perfilhamento; na fase reprodutiva, induz a esterilidade polínica e quebras no número de grãos por espiga; e, na etapa de enchimento, encurta o período de acúmulo de matéria seca, depreciando o peso dos grãos e a qualidade industrial exigida pela panificação. Adicionalmente, verificou-se que o microclima quente e úmido potencializa a incidência de doenças fúngicas de alto impacto econômico, como a giberela e a brusone.

Como contribuição, o estudo reforça que a convivência com as variações térmicas e com os cenários de mudanças climáticas depende de um planejamento agrícola assertivo. A alocação adequada da época de semeadura com base no ZARC, o manejo eficiente da irrigação e, sobretudo, o investimento contínuo em cultivares geneticamente adaptadas, são medidas indispensáveis para assegurar a estabilidade produtiva e a sustentabilidade da triticultura nacional.

Sugere-se que futuras investigações aprofundem a avaliação econômica do estresse térmico em safras específicas e monitorem o desempenho de novos genótipos tropicais sob condições controladas de aquecimento global.

REFERÊNCIAS

Abitrigo – Associação Brasileira da Indústria do Trigo. **Trigo desempenha papel fundamental na produção de alimentos**. 2023. Disponível em: https://abitrigo.com.br/trigo-desempenha-papel-fundamental-na-producao-de-alimentos/. Acesso em: 14 set. 2026.

Akmal, M.; Alotaibi, M. Physiological and yield responses of wheat under heat stress and water deficit conditions. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 13, n. 4, p. 65-79, 2021.

Alvarenga, C. H. **Estresse térmico e respostas morfofisiológicas em cereais de inverno**. 2021. 142 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

Blumenthal, C. M.; Barlow, E. W. R.; Wrigley, C. W. Growth environment and wheat quality: The effect of heat stress on the functional properties of wheat. **Journal of Cereal Science**, London, v. 18, n. 1, p. 3-21, 1993.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC)**. Brasília, DF: MAPA, 2017.

Caierão, E. *et al*. **Trigo no Brasil**: bases para produção competitiva e sustentável. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2014.

Castro, P. R. C.; Kluge, R. A. **Ecofisiologia dos cultivos agrícolas**. São Paulo: Ceres, 1999.

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). **Boletim da Safra de Grãos**: 11º levantamento, safra 2025/2026. Brasília, DF: Conab, 2026.

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). **Boletim de monitoramento dos cultivos de verão e inverno**. Brasília, DF: Conab, ago. 2026.

Cunha, G. R.; Caierão, E. **Escalas de desenvolvimento do trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2023.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Brusone do trigo**: estratégias de manejo e controle. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2024.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Fatores abióticos envolvidos na tolerância de trigo à geada**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2020a.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Giberela e micotoxina no ensaio estadual de cultivares de trigo em 2020 e 2021**. Brasília, DF: Embrapa, 2020b.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Trigo no Brasil**: bases para produção competitiva e sustentável. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2026a.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Nota técnica**: El Niño 2026-2027. Brasília, DF: Embrapa Digital, 2026b.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Food Outlook**: Biannual Report on Global Food Markets. Roma: FAO, 2026.

Farooq, M. *et al*. Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 30, n. 3, p. 191-217, 2011.

Guarienti, E. M. *et al*. Efeito do estresse térmico na qualidade industrial de cultivares de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n. 8, p. 773-779, 2005.

Liu, Y. *et al*. Global impacts of heat stress on wheat yield, starch content, and grain weight: A meta-analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 278, p. 108-125, 2026.

Manfron, P. A.; Lazzarotto, C.; Medeiros, S. L. P. Ecofisiologia do trigo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 45-56, 1993.

Marchioro, V. S. **Morfologia e desenvolvimento da planta de trigo**. Londrina: UEL, 2022.

Montecelli, J. *et al*. Escalas fenológicas e crescimento do trigo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 210-218, 2014.

ONDAS de calor elevam preços globais de alimentos e grãos. **UN News**, Nova York, 2026.

Pereira, J. L. *et al*. Expansão da triticultura para regiões tropicais no Brasil central: desafios e perspectivas. **Bragantia**, Campinas, v. 83, e2024012, 2024.

Porter, J. R.; Gawith, M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p. 23-36, 1999.

Rissi, D. **Respostas morfofisiológicas e estresse oxidativo em trigo submetido a altas temperaturas**. 2022. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

Santi, A. *et al*. Mudanças climáticas e o zoneamento agrícola de risco climático para o trigo no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 2, p. 241-250, 2017.

Sarkar, S. *et al*. Physiological and molecular mechanisms of heat stress tolerance in wheat. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, p. 658-670, 2021.

Teixeira, E. I. Impactos das mudanças climáticas na agricultura de sequeiro no Brasil. **Agribus**, Curitiba, v. 15, n. 2, p. 88-102, 2020.