

Fatores abióticos envolvidos na tolerância de trigo à geada

Eunice Portela da Silva⁽¹⁾, Gilberto Rocca da Cunha⁽²⁾, João Leonardo Fernandes Pires⁽²⁾,
Genei Antonio Dalmago⁽²⁾ e Aldemir Pasinato⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade de Passo Fundo, BR 285, Km 171, Bairro São José, CEP 99001-970 Passo Fundo, RS. E-mail: eunycy@yahoo.com.br

⁽²⁾Embrapa Trigo, Caixa Postal 451, CEP 99001-970 Passo Fundo, RS. E-mail: cunha@cnpt.embrapa.br, pires@cnpt.embrapa.br, dalmago@cnpt.embrapa.br, aldemir@cnpt.embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da aclimação, da intensidade de geada e da disponibilidade hídrica sobre os danos causados pela geada em trigo. Os experimentos foram conduzidos em telados, com trigo cultivado em vasos. A aclimação e a incidência de geada foram simuladas em câmaras de crescimento. Os fatores abióticos avaliados foram: regimes de aclimação (com e sem); gradiente de temperatura (2, -2, -4 e -7°C); e variação de disponibilidade hídrica no solo, antes da geada (9, 6, 3 e 1 dia sem irrigação). Todos os fatores foram avaliados no afilhamento, alongamento e espigamento das cultivares: BR-18 Terena, mais tolerante à geada; e BRS 194, menos tolerante. As variáveis avaliadas foram: grau de queima de folhas, sete dias após a geada; massa de matéria seca total; e massa de grãos. A aclimação do trigo, antes da geada, diminuiu os danos provocados antes do espigamento, e resultou em menor queima de folhas e maior rendimento de grãos. A temperatura de -7°C, no espigamento, resultou em falha na produção de grãos de ambas as cultivares; e os prejuízos com geada foram menores nas plantas com nove dias sem irrigação. As condições anteriores à ocorrência de geada têm influência sobre os danos provocados por ela.

Termos para indexação: *Triticum aestivum*, aclimação, congelamento, deficit hídrico, estágio fenológico.

Abiotic factors involved in wheat tolerance to frost

Abstract – The objective of this work was to evaluate the influence of acclimatization, frost intensity and soil water availability on damage caused by frost on wheat. The experiments were carried out in screen house conditions. The wheat plants were grown in pots. The acclimatization and frost incidence were simulated in a growth chamber. The abiotic factors evaluated were: acclimatization regimes (with and without); temperature gradient (2, -2, -4 and -7°C) and variation of soil water availability prior to frost incidence (9, 6, 3 and 1 day without irrigation). All factors were evaluated at tillering, stem elongation and heading stage on wheat cultivars BR-18 Terena, more tolerant to frost, and BRS 194, less tolerant. The response variables were: degree of leaf scorching symptoms at 7 days after frost; total dry weight; and grain weight. The acclimatization, before frost, decreased the damage caused on wheat heading stage, which resulted in less leaf scorching symptoms and higher grain yield. Temperature of -7°C, at heading stage, resulted in grain set failure in both cultivars; and frost damage was lower in plants with nine days without irrigation. Prevailing conditions before frost influence frost damage.

Index terms: *Triticum aestivum*, acclimatization, freezing, water deficit, growth stage.

Introdução

Geadas extemporâneas frequentemente causam reduções de rendimento de grãos em trigo, a depender do estágio fenológico de desenvolvimento das plantas, por ocasião da geada, e de fatores abióticos a ela associados. A quantificação da resposta à geada, pelos genótipos de trigo brasileiros, é muito pouco conhecida ou quase inexistente em alguns aspectos como, por exemplo, a reação ao efeito da geada em condições distintas de disponibilidade de umidade do

solo. Pouco se conhece, também, sobre o efeito de diferentes intensidades de geada em genótipos de trigo brasileiros selecionados em ambiente diferente dos de outras partes do mundo.

O trigo é capaz de resistir ao congelamento das células por um processo chamado de aclimação ao frio (Vágújfalvi et al., 1999). O fenômeno ocasiona mudanças fisiológicas, bioquímicas e moleculares (Fowler et al., 1999; Vágújfalvi et al., 1999; Yoshida et al., 1999; Borovskii et al., 2002) que tornam

as plantas resistentes não somente a temperaturas congelantes, mas também à desidratação induzida pelo congelamento.

A aclimação ocorre de acordo com a ação sequencial de temperaturas de resfriamento (temperatura do ar maior que 0°C) e de congelamento (-3 e -5°C). A diminuição do potencial hídrico nos tecidos, em razão da diminuição do potencial osmótico (Gusta et al., 2004) pela acumulação de açúcar nos vacúolos (Fujikawa et al., 1999), é o aspecto mais importante. Esse processo está correlacionado ao aumento significativo do teor de ácido absísico (ABA) e resulta na modificação da síntese de proteínas (Ouellet et al., 2001; Pearce, 2001). Entre os cereais, ocorre grande diferença na exigência da temperatura acima de 0°C, necessária para a iniciação da aclimação (Săulescu & Braun, 2001). Trigo e cevada de primavera aclimatam em temperatura abaixo de 2°C (Gusta et al., 1997). Outros estresses abióticos, como deficiência hídrica e vento, também induzem à tolerância ao congelamento (Săulescu & Braun, 2001).

Para Săulescu & Braun (2001), a tolerância ao frio não é uma condição estática, pois ocorrem mudanças com o tempo, a temperatura do ar, a umidade das plantas e do solo, a nutrição, o estágio de desenvolvimento e as condições fisiológicas. A aclimação ao frio depende basicamente desses fatores, e pode ser parada, revertida e reiniciada. Períodos prolongados com a temperatura do ar abaixo de 0°C diminuem significativamente a tolerância ao frio em plântulas de trigo de inverno, em que a tolerância máxima à geada, nas plantas completamente aclimatadas, pode chegar a -15°C, por 6 dias, e sobrevivência a -18°C, por 24 horas, e a -23°C, por 12 horas (Gusta et al., 1982). Entretanto, quanto maior for o tempo de exposição à temperatura congelante, maiores serão os danos provocados ao trigo (Shroyer et al., 1995; Veisz et al., 2001).

O estado hídrico do solo pode acentuar ou atenuar os efeitos da geada. Os danos serão mais severos em solos saturados do que em secos (Szűcs et al., 2003). Quanto maior a proximidade da capacidade de campo, maior será a disponibilidade hídrica às plantas, o que deixa as células bem hidratadas e potencializa os danos da geada.

Quando as plantas são expostas à geada, o crescimento do gelo extracelular provoca o movimento de água do protoplasto para o espaço extracelular, o que desidrata a célula (Xin & Browse, 2000). Quanto mais

concentrada a solução celular, menor será o potencial da água e a desidratação provocada por temperatura congelantes.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da aclimação, da intensidade de geada e da disponibilidade hídrica quanto à extensão dos danos provocados à cultura de trigo.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado em 2004 e 2005 na Embrapa Trigo, no Município de Passo Fundo, RS (28°15'S, 52°24'W, a 687 m de altitude).

Os experimentos foram conduzidos em vasos (unidades experimentais), em condições de telado (tela clarite de polietileno), de junho a outubro. Nesse período, os principais elementos meteorológicos (temperatura, umidade relativa do ar média e radiação solar) permaneceram próximos às condições normais para a região. No telado, observou-se redução de 9% na luminosidade e aumento de 1,5°C na temperatura e de 10% na umidade relativa do ar média, em relação ao ambiente externo.

As cultivares de trigo utilizadas foram a BR18-Terena e a BRS 194, mais e menos suscetível a geada, respectivamente (Scheeren et al., 2000). As sementes foram tratadas com fungicida e inseticida, indicados para a cultura do trigo, e colocadas em germinador a 20°C por 48 horas (antes do plantio), em papel de germinação umedecido. A semeadura foi realizada no período indicado para a cultura (Reunião..., 2004), em vasos tipo PVC com 7,8 kg de solo não peneirado, homogeneizado, extraído do horizonte A de um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa (Embrapa, 1999), corrigido conforme a análise de solo, conforme indicação para a cultura (Reunião..., 2004). Em cada unidade experimental (452,16 cm²), foram colocadas 15 sementes pré-germinadas. Após a emergência foi realizado o desbaste, tendo-se deixado nove plantas por vaso, nos experimentos de 2004, e sete plantas, nos experimentos de 2005.

Os tratamentos culturais de adubação e controle fitossanitário foram realizados conforme indicações da Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo (Reunião..., 2004). A irrigação dos vasos foi realizada diariamente, com 0,25 L de água, pela manhã, e 0,25 L à tarde, no início do estabelecimento das plantas (em torno de 15 dias) e, posteriormente, o solo foi mantido

próximo à capacidade de campo, por meio da reposição diária do consumo de água. Em dias de ocorrência de precipitação pluvial, a irrigação foi desligada.

A simulação de geada foi realizada em câmara de crescimento, com intensidade máxima de luz de $1.225 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, temperatura de -10 a 50°C , com precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. A simulação de geada foi realizada quando a temperatura da câmara de crescimento chegava próximo a 0°C . As plantas foram umidificadas com água fria (água na temperatura do ambiente do fitotron, no momento da pulverização), com o auxílio de um pulverizador. O processo de umidificação tinha por finalidade incitar a formação de cristais de gelo nas superfícies expostas das plantas e simular, assim, a formação de geada. Foram realizados três experimentos para atender aos objetivos.

O primeiro experimento foi realizado em 2004 e 2005 e simulou a geada em plantas aclimatadas e não aclimatadas. Em 2004, foram simuladas geadas nos estádios de alongamento e espigamento do trigo e, em 2005, nos estádios de afilhamento, alongamento e espigamento. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em arranjo fatorial, com quatro repetições. Os tratamentos empregados foram as duas cultivares de trigo (BR18-Terena e BRS 194), a geada (com e sem aplicação) e os dois regimes térmicos (aclimatado e não aclimatado). No tratamento aclimatado, as plantas foram para a câmara de crescimento três dias antes da geada e foram submetidas a temperaturas baixas (ciclo diário com mínima de 2°C e máxima de 12°C). A aplicação da geada foi feita no quarto dia, com ciclo diário de temperatura do ar entre 12 e -7°C , com permanência por uma hora à temperatura mínima (-7°C), e de volta, então, ao regime de aclimação, com temperatura de 2°C . No tratamento não aclimatado, as plantas foram para a câmara de crescimento no dia da simulação de geada. Nesse dia, as plantas sem aplicação de geada ficaram em outra câmara de crescimento, com temperatura de aclimação. Após a geada, tanto as plantas aclimatadas, quanto as não aclimatadas permaneceram na câmara de crescimento por mais três dias, com temperatura de aclimação. A definição do regime de aclimação foi baseada em Wendt & Rosa (1989), enquanto os regimes de geadas (de todos os experimentos) foram definidos com base em estudo prévio da climatologia das geadas, no local de realização dos experimentos, em que a temperatura máxima foi de 12°C .

O segundo experimento foi conduzido em 2004 e simulou intensidades de geada. Foi realizado em delineamento inteiramente casualizado e arranjo fatorial, com quatro repetições. Os tratamentos foram duas cultivares de trigo (BR18-Terena e BRS 194) e quatro intensidades de geada: sem geada, e com geadas leve, moderada e forte, a 2 , -2 , -4 e -7°C , respectivamente. As intensidades de geadas foram simuladas com o ciclo térmico diário normal, temperatura máxima igual a 12°C e taxa horária de variação da temperatura de 2°C , entre as temperaturas mínimas e máximas.

As geadas do segundo experimento foram simuladas no alongamento e no espigamento, com plantas aclimatadas de acordo com os mesmos procedimentos do experimento 1. No dia da aplicação da geada, após uma hora da temperatura da câmara de crescimento ter atingido a intensidade de geada -2°C , as plantas, nessa intensidade, foram retiradas para outra câmara com temperatura de 0°C . O mesmo procedimento foi realizado com as plantas submetidas à intensidade -4°C . Quando a temperatura da câmara atingiu 2°C , as plantas passaram para o regime térmico de aclimação (conforme descrito no experimento 1). As plantas com simulação de geada de -7°C permaneceram na câmara de crescimento inicial, em regime térmico de geada até que fossem atingidos 2°C , quando foi alterado para regime de temperatura de aclimação. Após a geada, os procedimentos, para todas as intensidades, foram idênticos ao experimento 1. As plantas que não receberam geada foram colocadas em outra câmara de crescimento, com temperatura de aclimação.

O terceiro experimento foi conduzido em 2005, em casa de vegetação e telado, e simulou a geada em plantas submetidas a diferentes disponibilidades hídricas. A geada foi aplicada nos estádios de afilhamento, alongamento e espigamento do trigo. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado em arranjo fatorial, com três repetições. Os tratamentos foram duas cultivares de trigo (BR18-Terena e BRS 194), geada (com e sem aplicação) e disponibilidade hídrica (nove dias, seis dias, três dias e um dia sem as plantas receberem água, antes da geada). No afilhamento, as plantas foram transferidas para casa de vegetação, e lá permaneceram até que as plantas do último estágio (espigamento) fossem submetidas à geada, quando então foram transferidas para o telado até o fim do ciclo.

A disponibilidade hídrica foi estabelecida com base no número de dias sem irrigação, antes da geada, em cada estádio, da seguinte forma: quando definido o estádio fenológico para a aplicação de geada, as plantas do tratamento com déficit hídrico de nove dias receberam 1,5 L de água (equivalente a 33 mm de chuva) e não foram mais irrigadas até o dia da geada (nove dias depois). O mesmo procedimento foi adotado também para os demais tratamentos de disponibilidade hídrica. A geada foi aplicada em um mesmo dia para todos os tratamentos, com temperatura mínima de -7°C. As plantas que receberam apenas o tratamento de disponibilidade hídrica (sem geada) permaneceram em câmara de crescimento, com temperatura de aclimação, conforme descrito no experimento 1.

Para avaliar os estádios de afilhamento, alongamento e espigamento do trigo, foi utilizada a escala de Feekes, modificada por Large (Scheeren, 1986). Essa avaliação foi feita visualmente. Quando mais de 50% das plantas se enquadraram em determinado estágio, considerou-se que ele havia sido atingido.

Foram feitas avaliações de queima de folhas e determinações de massa de matéria seca total (MST) e de massa de matéria seca de grãos (MSG). A percentagem de queima de folha foi avaliada aos 7 dias após a geada, pela atribuição de notas por observação visual. As notas foram atribuídas às plantas de cada vaso por três pessoas, tendo-se adotado escala de 1 a 5, em que: 1, 0–20%; 2, 20–40%; 3, 40–60%; 4, 60–80%; e 5, 80–100% de queima de folhas. Para o cálculo da nota final, foi considerada a média das duas notas mais próximas, e a nota mais discrepante foi descartada. A MS total e de grãos foi determinada em 2004 e 2005, após a maturação fisiológica dos grãos. As plantas foram colhidas rente ao solo para avaliação da MS total da parte área. O material foi secado em estufa a 65°C, até massa constante. Em seguida, foi feita a trilha das espigas, e os grãos foram secados em estufa a 65°C, até massa constante determinada em balança de precisão.

Os dados de massa de grãos e as notas de queima de folha foram transformados para $(y + 1)^{0.5}$. Aos dados obtidos foi aplicada a análise de variância, seguida da comparação das médias pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Resultados e Discussão

No estudo de simulação de geada com aclimação de plantas (experimento 1), houve interação significativa quanto à queima de folhas entre regime térmico, cultivar e geada, nos três estádios de desenvolvimento avaliados (Tabela 1). A percentagem de queima foi menor nas plantas aclimatadas, submetidas à simulação de geada, em relação às não aclimatadas. A cultivar BR18-Terena apresentou maior diferença entre plantas aclimatadas e não aclimatadas, nos três estádios avaliados, em relação à BRS 194. No entanto, a queima foi mais severa no espigamento, em ambas as cultivares (Tabela 1), em razão da menor capacidade de aclimação do trigo no espigamento do que no estádio vegetativo (Shroyer et al., 1995; Scheeren et al., 2000). Isso demonstra que a aclimação torna o trigo mais tolerante à geada e possibilita minimizar o dano provocado pelo frio (Fowler et al., 1999; Xin & Browse, 2000).

Quanto às MST e MSG, no experimento 1, houve interação significativa entre regime térmico, cultivar e geada, em 2004 (Tabela 2). Não houve diferença para essas variáveis entre plantas aclimatadas e não aclimatadas, submetidas à geada no alongamento e no espigamento. Porém, com geada no alongamento, as plantas aclimatadas da cultivar BRS 194 tiveram maior redução de MST e MSG do que aquelas da cultivar BR18-Terena, em relação ao tratamento sem geada (Tabela 2). Quando a geada (-7°C) ocorreu no espigamento, as plantas aclimatadas e as não aclimatadas não apresentaram formação de grãos (Tabela 2). Nesse estádio, o trigo é mais sensível à

Tabela 1. Percentagem de queima de folhas, sete dias após a simulação da geada, em dois regimes térmicos diferentes, três distintos estádios de desenvolvimento e duas cultivares de trigo⁽¹⁾.

Regime térmico	Cultivares			
	BR18-Terena		BRS 194	
	Com geada	Sem geada	Com geada	Sem geada
	Afilhamento			
Aclimatado	44,0Ab	0,0Ca	1,5Bb	0,0Ca
Não aclimatado	72,2Aa	0,0Ca	3,7Ba	0,0Ca
	Alongamento			
Aclimatado	21,5Ab	0,0Ba	0,0Bb	0,0Ba
Não aclimatado	50,0Aa	0,0Ca	2,0Ba	0,0Ca
	Espigamento			
Aclimatado	90,0Ab	0,0Ca	70,0Bb	0,0Ca
Não aclimatado	100,0Aa	0,0Ba	97,5Aa	0,0Ba

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

geada (Scheeren, 1982), em razão da grande quantidade de líquidos nos tecidos da flor, o que favorece o rápido resfriamento da câmara floral, prejudica a fecundação e, por consequência, reduz a produção de grãos.

Em 2005 (experimento 1), em relação à MST, não houve interação entre regime térmico, cultivar e geada, nos três estádios fenológicos avaliados (Tabela 3). Porém, houve diferença significativa entre tratamentos, e as plantas de trigo não aclimatadas e aquelas que receberam geada apresentaram menor produção de MST (Tabela 3). Com relação às cultivares, a BRS 194 teve maior produção de MST do que a BR18-Terena.

Quanto à MSG, em 2005, não houve interação significativa entre regime térmico, cultivar e geada, no aphilamento (Tabela 3). As plantas não aclimatadas apresentaram redução na produção de MSG, em relação às aclimatadas, mas não houve diferença de MSG entre os tratamentos com e sem geada. Entre cultivares, a BRS 194 teve maior produção de grãos do que a BR18-Terena, o que está de acordo com a maior produção de MST. Nos estádios de alongamento e espigamento, houve interação significativa entre cultivar e geada, e efeito simples quanto ao regime térmico (Tabela 3). Nesses dois estádios, as plantas não aclimatadas apresentaram redução de MSG, com diferenças superiores a 13%, em relação às plantas aclimatadas. A redução na MSG também foi observada

nas plantas que receberam geada, tanto no alongamento quanto no espigamento, independentemente da cultivar (Tabela 3). Também neste caso, a redução na produção de MSG na BR18-Terena esteve relacionada à sua menor produção de MST.

A diferença entre cultivares, tanto na MST quanto na MSG, está de acordo com os dados de Scheeren et al. (2000), que compararam em campo a BRS 194 e a BR18-Terena. A redução das perdas em plantas aclimatadas se deve à tolerância à formação de gelo intercelular, à desidratação e à concentração protoplasmática, em relação às não aclimatadas (Fowler et al., 1999). Segundo Săulescu & Braun (2001), a aclimação é influenciada pela genética e pelo desenvolvimento da planta, e também por fatores ambientais como a duração e a intensidade das temperaturas subzero (Gusta et al., 1997).

Na simulação de intensidade de geada (experimento 2), houve interação entre intensidade de geada e cultivar, apenas no alongamento. Isso foi observado tanto para MST quanto para MSG (Tabela 4). No caso

Tabela 2. Massa de matéria seca total da parte aérea e massa de matéria seca de grãos, nos estádios de alongamento e espigamento, em duas cultivares de trigo e em dois regimes térmicos de aclimação, com (CG) e sem simulação (SG) de geada⁽¹⁾.

Regime térmico	Cultivares			
	BR18-Terena		BRS 194	
	CG	SG	CG	SG
Massa de matéria seca total da parte aérea (g m⁻²)				
Alongamento				
Aclimatado	552,8Ba	534,8Ba	674,4Ba	1.218,1Aa
Não aclimatado	537,6Aa	537,6Aa	577,5Aa	576,3Ab
Espigamento				
Aclimatado	319,1Ca	534,8Ba	453,8BCa	1.218,1Aa
Não aclimatado	232,7Ba	537,6Aa	332,8Ba	576,3Ab
Massa de matéria seca de grãos (g m⁻²)				
Alongamento				
Aclimatado	161,9Ca	205,7BCa	241,5Ba	457,5Aa
Não aclimatado	177,3Aa	197,2Aa	207,2Aa	220,6Ab
Espigamento				
Aclimatado	0,0Ca	205,7Ba	0,0Ca	457,5Aa
Não aclimatado	0,0Ba	197,2Aa	0,0Ba	220,6Ab

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, em cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 3. Massa de matéria seca total da parte aérea e massa de matéria seca de grãos, nos estádios aphilamento, alongamento e espigamento, em duas cultivares de trigo e em dois regimes térmicos de aclimação, com e sem simulação de geada. Primeiro experimento.

Tratamentos	Aphilamento	Alongamento	Espigamento
Cultivar			
BR18-Terena	474,8b	425,0b	353,5b
BRS 194	602,5a	535,6a	444,2a
Regime térmico			
Aclimatado	568,9a	509,5a	431,9a
Não aclimatado	508,4b	451,2b	365,8b
Geada			
Com	506,9b	390,4b	227,4b
Sem	570,4a	570,4a	570,4a
Massa de matéria seca de grãos (g m ⁻²)			
Regime térmico			
Aclimatado	180,6a	152,6a	94,6a
Não aclimatado	159,8b	131,5b	81,6b
Geada			
Com	164,7a	-	-
Sem	175,7a	-	-
Cultivar			
BR18-Terena	137,2b		
Com geada		69,9a	0,0a
Sem geada		144,2b	144,2b
BRS 194	203,2a		
Com geada		146,8a	1,2a
Sem geada		207,3a	207,3a

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

da MST, não ocorreu diferença entre as intensidades de geada no alongamento, na 'BRS 194', enquanto que, na 'BR18-Terena' ocorreu redução de MST entre as intensidades -2 e -4°C (Tabela 4). Na intensidade de geada de -7°C, houve diferenças significativas entre cultivares, e a BR18-Terena apresentou menor MST que a BRS 194. Isso confirma menor suscetibilidade à geada da BRS 194 (Tabela 4), no alongamento, o que está de acordo com o observado por Scheeren et al. (2000).

Com geada no espigamento, não houve diferença na MST entre cultivares, mas se verificou redução na intensidade de -7°C (Tabela 4). Segundo Scheeren et al. (2000), em geadas fortes (abaixo de -2°C), durante a floração do trigo, são verificados danos irreversíveis nas espigas, e é difícil a obtenção de materiais tolerantes à geada no subperíodo reprodutivo. No espigamento do trigo (experimento 2), a geada compromete a produção de MST, em razão dos danos provocados pela formação de gelo entre as membranas das células e pela ruptura delas. Isso reduz a área fotossintética e a produção de fotoassimilados, com reflexo direto sobre flores férteis e produção de grãos (Rodrigues et al., 1998).

Com relação à MSG (experimento 2), quando a geada foi simulada no alongamento das plantas, verificou-se diferença significativa apenas na 'BR18-Terena' (Tabela 4). A maior perda de MSG foi observada na intensidade de -7°C, seguida da intensidade de -4°C, as quais foram diferentes entre si e das demais intensidades (-2 e +2°C). Entre cultivares, a diferença foi significativa somente na intensidade de -7°C, e seguiu a variação observada na MST (Tabela 4). No caso de

geada no espigamento, a 'BRS 194' apresentou menor MSG. Na avaliação das intensidades, a geada com -7°C resultou na menor produção de MSG, com diferença estatística quanto às demais intensidades (Tabela 4).

A inviabilização da produção de MSG, na intensidade de -7°C, ocorreu em razão de as temperaturas do ar extremas provocarem a esterilidade das espiguetas (Scheeren et al., 2000; Mistro & Camargo, 2002). De acordo com Shroyer et al. (1995), os danos ocorrem a partir da temperatura de -1°C, no subperíodo reprodutivo. Os principais sintomas são: esterilidade das flores, branqueamento de aristas e espigas, descoloração das folhas e o estrangulamento de colmos (Shroyer et al., 1995).

No terceiro experimento, ocorreu interação entre disponibilidade hídrica e geada, e entre cultivares e geada, no afilhamento, e entre disponibilidade hídrica, cultivares e geada, nos estádios do alongamento e espigamento, quanto à variável queima de folhas (Tabela 5). A queima de folhas foi menor nas plantas com nove dias sem irrigação, antes da geada, durante o afilhamento (Tabela 5). Com geada no alongamento e espigamento, a queima de folhas foi maior na 'BR18-Terena', em todas as disponibilidades hídricas, o que está de acordo com Scheeren et al. (2000). Em ambas as cultivares e em seus estádios, a queima de folhas foi maior nos tratamentos mais hidratados, comparada a daqueles com menor umidade, o que pode ser explicado pelo fato de o conteúdo hídrico celular ser inversamente relacionado à concentração do suco celular e, portanto, diretamente relacionado ao ponto de congelamento (Fowler et al., 1999). Nas plantas

Tabela 4. Massa de matéria seca total da parte aérea (MST) e massa de matéria seca de grãos (MSG), nos estádios alongamento e espigamento de duas cultivares de trigo, em diferentes intensidades de geada⁽¹⁾.

Intensidade de geada (°C)	MST (g m ⁻²)		Média	MSG (g m ⁻²)		Média
	BR 18-Terena	BRS 194		BR 18-Terena	BRS 194	
Alongamento						
+2	642,4Aa	612,1Aa	627,3	258,7Aa	217,1Aa	237,9
-2	643,0Aa	610,2Aa	626,6	259,7Aa	209,9Aa	234,8
-4	460,3Ab	526,7Aa	493,5	177,0Ab	168,7Aa	172,9
-7	435,4Bb	607,9Aa	521,7	113,9Bc	194,7Aa	154,3
Média	545,3	589,2	-	202,3	197,6	-
Espigamento						
+2	642,6	612,1	627,4a	258,7	217,1	237,9a
-2	607,9	615,7	611,8a	241,8	188,8	215,3a
-4	591,1	580,4	585,7a	232,0	179,9	206,0a
-7	452,8	447,3	450,1b	0,7	0,0	0,4b
Média	573,6A	563,9A	-	183,3A	146,5B	-

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas linhas, em cada variável, e minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

com nove dias sem irrigação, provavelmente ocorreu adaptação osmótica, que impede a saída de água da célula pelo aumento do potencial osmótico extracelular (Pearce, 2001).

Quanto à MST (experimento 3), ocorreu interação entre disponibilidade hídrica e geada apenas no estágio do espigamento, e interação significativa entre cultivar e geada, nos três estádios avaliados (Tabela 6). Em praticamente todos os estádios, houve redução da MST no tratamento com geada, em ambas as cultivares. A redução foi maior na 'BR18-Terena' do que na 'BRS 194', o que está de acordo com os dados de Scheeren et al. (2000). Diferenças na MST foram verificadas somente nos estádios de alongamento e espigamento, e o menor valor foi verificado na condição de nove dias sem irrigação, no estágio do alongamento, e na condição de um dia sem irrigação, durante o espigamento (Tabela 6).

A diferença na produção de MST com e sem geada, no tratamento de nove dias sem irrigação, pode ser explicada pela menor suplementação hídrica que ocorreu nesse caso, o que pode ter proporcionado ajuste osmótico. A diferença observada entre cultivares deveu-se aos graus distintos de tolerância à geada (Scheeren et al., 2000).

No caso da produção de MSG, no terceiro experimento, foram verificadas interações significativas entre cultivar e geada e efeito simples da disponibilidade hídrica, durante o afilhamento. No alongamento, a interação significativa ocorreu entre disponibilidade hídrica e cultivar e entre cultivar e geada. No espigamento, houve interação entre disponibilidade hídrica e geada e entre cultivar e geada (Tabela 7).

No afilhamento, não houve diferença na MSG entre os tratamentos de disponibilidade hídrica; verificou-se apenas que a cultivar BR18-Terena apresentou

Tabela 5. Percentagem de queima de folhas, sete dias após a simulação da geada, nos tratamentos com e sem geada, no afilhamento, alongamento e espigamento de duas cultivares de trigo, submetidas a quatro disponibilidades hídricas⁽¹⁾.

Dias de interrupção na irrigação	BR18-Terena		BRS 194		Média	
	Com geada	Sem geada	Com geada	Sem geada	Com geada	Sem geada
Afilhamento						
9	38,3	0,0	1,3	0,0	19,8Ab	0,0Ba
6	53,3	0,0	6,0	0,0	29,6Aa	0,0Ba
3	58,3	0,0	2,3	0,0	30,3Aa	0,0Ba
1	58,3	0,0	3,3	0,0	30,8Aa	0,0Ba
Média	52,1A	0,0B	3,2A	0,0B	27,6	0,0
Alongamento						
9	49,0Ab	0,0Ca	2,3Bc	0,0Ca	25,6	0,0
6	52,3Ab	0,0Ca	5,7Bb	0,0Ca	29,0	0,0
3	77,7Aa	0,0Ca	5,0Bbc	0,0Ca	41,3	0,0
1	66,7Aa	0,0Ca	23,3Ba	0,0Ca	45,0	0,0
Média	61,4	0,0	9,1	0,0	35,2	0,0
Espigamento						
9	20,0Ab	0,0Ba	4,7Bab	0,0Ba	12,3	0,0
6	66,7Aa	0,0Ca	10,8Bab	0,0Ca	38,7	0,0
3	89,3Aa	0,0Ca	12,3Ba	0,0Ca	50,8	0,0
1	56,7Aa	0,0Ba	1,0Bb	0,0Ba	28,8	0,0
Média	58,2	0,0	7,2	0,0	32,7	0,0

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 6. Massa de matéria seca total da parte aérea (g m^{-2}) no afilhamento, alongamento e espigamento, em duas cultivares de trigo submetidas a diferentes disponibilidades hídricas, com (CG) e sem simulação (SG) de geada. Terceiro experimento⁽¹⁾.

Tratamento	Afilhamento		Alongamento		Espigamento	
	CG	SG	CG	SG	CG	SG
Cultivar						
BR18-Terena	498,3Bb	578,7Aa	207,6Bb	347,6Aa	193,0Bb	445,1Ab
BRS 194	576,2Aa	541,1Ab	309,5Ba	346,1Aa	225,3Ba	544,0Aa
Dispon. hídrica						
9 dias		553,6a		278,4c		275,8Ba
6 dias		551,8a		307,4b		218,9Bab
3 dias		542,7a		319,1a		181,9Bab
1 dia		545,1a		305,8b		159,9Bb

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 7. Massa de matéria seca de grãos (g m⁻²) no afilhamento, alongamento e espigamento, em duas cultivares de trigo submetidas a diferentes disponibilidades hídricas, com (CG) e sem simulação de geada (SG). Terceiro experimento⁽¹⁾.

Dias de interrupção na irrigação	Afilhamento				Alongamento				Espigamento			
	BR18-Terena		BRS 194		BR18-Terena		BRS 194		CG		SG	
	CG	SG	CG	SG	CG	SG	CG	SG	BR18-Terena	BRS 194	BR18-Terena	BRS 194
Irrigação normal ⁽¹⁾												
0 dia	191,4Ba	223,8Aa	212,1Aa	197,1Ab	58,9Bb	108,7Ab	125,8Aa	127,3Aa	6,6Bb	17,7Ba	166,4Aa	151,2Aa
Com interrupção na irrigação ⁽²⁾												
9 dias		241,1a			73,1Bb		116,5Aa		34,5Ba			112,3Ab
6 dias		209,3a			92,1Bab		119,9Aa		10,9Bb			179,5Aa
3 dias		202,6a			101,7Aa		124,3Aa		0,6Bb			184,3Aa
1 dia		198,4a			102,1Aa		111,1Aa		2,6Bb			159,8Aab

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas para presença ou ausência de geada, em uma mesma cultivar, e minúsculas para cultivares em um mesmo tratamento de geada, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

redução da MSG, quando foi simulada a geada, em relação à BRS 194. A mesma resposta da 'BR18-Terena' quanto, à MSG, foi verificada nos estádios de alongamento e espigamento (Tabela 7).

A geada no alongamento reduziu a produção de MSG no tratamento de nove dias, embora não tenha sido estatisticamente diferente do tratamento de seis dias sem irrigação (Tabela 7). Provavelmente, a resposta está relacionada ao menor acúmulo de fotoassimilados na planta, em razão da menor suplementação hídrica, no tratamento de nove dias, o que pode ter reduzido a MSG. Nesse estádio, tanto a 'BRS 194' quanto a 'BR18-Terena' apresentaram menor MS de grãos no tratamento com geada.

No tratamento com geada no espigamento, tanto a 'BRS 194' quanto a 'BR18-Terena' apresentaram menor MSG no tratamento com geada, em comparação com aquele sem geada (Tabela 7). Com relação aos tratamentos de disponibilidade hídrica, verificou-se que os tratamentos de um, três e seis dias sem irrigação, antes da geada, apresentaram menor produção de MSG, em relação ao tratamento de nove dias sem irrigação. Essa resposta evidencia possíveis mecanismos de tolerância do trigo à geada, na fase reprodutiva, dependentes da condição de disponibilidade hídrica no solo e, provavelmente, associados a adaptações osmóticas na célula, que impedem a saída de água da célula pelo aumento do potencial osmótico extracelular (Pearce, 2001).

Conclusões

1. A aclimação do trigo, antes da ocorrência de geada, diminui os danos provocados por ela nos estádios que antecedem o espigamento, e resulta em menor queima de folhas e maiores rendimentos de grãos.

2. Geada com temperatura do ar de -7°C, no espigamento, ocasiona perda total na produção de grãos, independentemente do grau de tolerância que os genótipos tenham apresentado em estádios anteriores.

3. A redução da disponibilidade hídrica do solo reduz perda de rendimento de grãos pela geada, durante o espigamento do trigo.

Referências

- BOROVSKII, G.B.; STUPNIKOVA, I.V.; ANTIPINA, A.I.; VOINIKOV, V.K. Accumulation of dehydrins and ABA-inducible proteins in wheat seedlings during low-temperature acclimation. **Russian Journal of Plant Physiology**, v.49, p.229-234, 2002.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.
- FOWLER, D.B.; LIMIN, A.E.; RITCHIE, J.T. Low-temperature tolerance in cereals: model and genetic interpretation. **Crop Science**, v.39, p.626-633, 1999.
- FUJIKAWA, S.; JITSUYAMA, Y.; KURODA, K. Determination of the role of cold acclimation-induced diverse changes in plant cells from the viewpoint of avoidance of freezing injury. **Journal of Plant Research**, v.112, p.237-244, 1999.
- GUSTA, L.V.; BURKE, M.J.; TYLER, N.J. Factors influencing hardening and survival in winter wheat. In: LI, P.H.; SAKAI, A. (Ed.). **Plant cold hardiness and freezing stress**. New York: Academic Press, 1982. v.2. p.23-40.
- GUSTA, L.V.; WILLEN, R.; FU, P.; ROBERTSON, A.J.; WU, G.H. Genetic and environmental control of winter survival of winter cereals. **Acta Agronomica Hungarica**, v.45, p.231-240, 1997.
- GUSTA, L.V.; WISNIEWSKI, M.; NESBITT, N.T.; GUSTA, M.L. The effect of water, sugars and proteins on the pattern of ice nucleation and propagation in acclimated and nonacclimated canola leaves. **Plant Physiology**, v.135, p.1642-2653, 2004.
- MISTRO, J.C.; CAMARGO, C.E. de O. Avaliação da produção de grãos e características agrônomicas em genótipos de trigo, em 1999 e 2000. **Bragantia**, v.61, p.35-42, 2002.

- OUELLET, F.; CARPENTIER, E.; COPE, M.J.T.V.; MONROY, A.F.; SARHAN, F. Regulation of a wheat action-depolymerizing factor during cold acclimation. **Plant Physiology**, v.125, p.360-368, 2001.
- PEARCE, R.S. Plant freezing and damage. **Annals of Botany**, v.87, p.417-424, 2001.
- REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 36, 2004, Passo Fundo. **Indicações técnicas da Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo: trigo e triticale - 2004**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. 152p.
- RODRIGUES, O.; LHAMBY, J.C.B.; DIDONET, A.D.; MARCHESE, J.A.; SCIPIONI, C. Efeito da deficiência hídrica na produção de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p.839-846, 1998.
- SĂULESCU, N.N.; BRAUN, H.-J. Cold tolerance. In: REYNOLDS, M.P.; ORTIZ-MONASTERIO, J.I.; McNAB, A. (Ed.). **Application of physiology in wheat breeding**. México: Cimmyt, 2001. p.111-123.
- SCHEEREN, P.L. Danos de geada em trigo: avaliação preliminar de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.17, p.853-858, 1982.
- SCHEEREN, P.L. **Informações sobre o trigo** (*Triticum* spp.). Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1986. 34p. (Embrapa Trigo. Documentos, 2).
- SCHEEREN, P.L.; CUNHA, G.R.; QUADROS, F.J.S. de; MARTINS, L.F. **Efeito do frio em trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 2p. (Embrapa Trigo. Comunicado Técnico online, 57).
- SHROYER, J.P.; MIKESSELL, M.E.; PAULSEN, G.M. **Spring freeze injury to Kansas wheat**. Manhattan: Kansas State University, 1995. 12p.
- SZÚCS, P.; VEISZ, O.; BEDŐ, Z. Frost tolerance of *Triticum durum* (Desf.) genotypes in soils with various moisture contents. **Cereal Research Communications**, v.31, p.153-160, 2003.
- VÁGÚJFALVI, A.; KEREPESEI, I.; GALIBA, G.; TISCHNER, T.; SUTKA, J. Frost hardiness depending on carbohydrate changes during cold acclimation in wheat. **Plant Science**, v.144, p.85-92, 1999.
- VEISZ, O.; BRAUN, H.-J.; BEDŐ, Z. Plant damage after freezing, and the frost resistance of varieties from the facultative and winter wheat observation nurseries. **Euphytica**, v.119, p.179-183, 2001.
- WENDT, W.; ROSA, O.S. Avaliação preliminar do efeito da geada sobre a fertilidade de espiga em trigo (*Triticum aestivum* L.), sob condições controladas. In: MOTA, F.S. da. (Ed.) **Agrometeorologia do trigo no Brasil**. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989. p.87-94.
- XIN, Z.; BROWSE, J. Cold comfort farm: the acclimation of plants to freezing temperatures. **Plant, Cell and Environment**, v.23, p.893-902, 2000.
- YOSHIDA, S.; HOTSUBO, K.; KAWAMURA, Y.; MURAI, M.; ARAKAWA, K.; TAKEZAWA, D. Alterations of intracellular pH in response to low temperature stresses. **Journal of Plant Research**, v.112, p.225-236, 1999.

Recebido em 9 de junho de 2008 e aprovado em 8 de setembro de 2008

