

Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho

Nereu Augusto Streck⁽¹⁾ e Cleber Maus Alberto⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Dep. de Fitotecnia, CEP 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: nstreck1@smail.ufsm.br, cleberalb@yahoo.com.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar, por meio de estudo numérico, a existência de impacto da possível mudança climática sobre o rendimento das culturas do trigo, soja e milho, em Santa Maria, RS. Foram criados cenários de mudança climática, dobrando-se a quantidade de CO₂, com diferentes aumentos de temperatura do ar, com aumento e sem aumento de precipitação pluvial. O rendimento das três culturas foi simulado com modelos matemáticos disponíveis na literatura. Concluiu-se que a mudança climática, projetada pela simulação, influenciará o rendimento de grãos de trigo, soja e milho, em Santa Maria, RS. O aumento de 2, 3 e 6°C na temperatura do ar pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ no rendimento de trigo, soja e milho, respectivamente.

Termos para indexação: *Triticum aestivum*, *Glycine max*, *Zea mays*, aquecimento global, suprimento de alimentos, agricultura.

Numerical study of the impact of climate change on the yield of wheat, soybean and maize

Abstract – The objective of this work was to evaluate through a numerical study the impact of a possible climate change on the yield of wheat, soybean and maize, in Santa Maria, RS. Climate change scenarios were created by doubling CO₂, with different increases in air temperature, and with increases and without increases in rainfall. Yield of the three crops was simulated with models available in the literature. It was concluded that projected climate change will affect wheat, soybean and maize yield in Santa Maria, RS, Brazil. The increase of 2, 3 and 6°C may cancel the benefits of increasing CO₂ on yield of wheat, soybean and maize, respectively.

Index terms: *Triticum aestivum*, *Glycine max*, *Zea mays*, global warming, food supply, agriculture.

Introdução

A concentração de CO₂ da atmosfera terrestre tem aumentado, como resultado direto das atividades humanas, a uma taxa de 0,4–0,5% por ano ou 1–1,8 μmol CO₂ mol⁻¹ por ano (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1995; Streck, 2005). Como resultado desse fato, a temperatura média do ar da Terra poderá, também, aumentar neste período, graças ao efeito estufa do CO₂ atmosférico. Embora o aumento na temperatura global previsto para o futuro, em consequência do aumento de CO₂ atmosférico, ainda seja um assunto em debate, estudos numéricos com modelos de circulação geral da atmosfera (GCM – general circulation models) indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1 a 6°C na temperatura média do ar, até o final deste século, em vários locais do Planeta (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1995; Streck, 2005), inclusive no Brasil (Siqueira et al., 1994, 2000).

Em plantas, o aumento da concentração de CO₂ atmosférico causa aumento da taxa de crescimento, pois o CO₂ é o substrato primário para fotossíntese (Taiz & Zeiger, 1991). Plantas com metabolismo C₃ são mais beneficiadas pelo aumento de CO₂ atmosférico do que plantas com metabolismo C₄ (Tubiello et al., 2000; Siqueira et al., 2001; Streck, 2005). No entanto, se o aumento da concentração de CO₂ for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e no rendimento das culturas, principalmente em razão do encurtamento do seu ciclo de desenvolvimento (Butterfield & Morison, 1992; Siqueira et al., 2001) e aumento da respiração (fotorrespiração e fase escura da respiração) do tecido vegetal (Taiz & Zeiger, 1991; Streck, 2005).

Análises de impacto do tempo meteorológico e do clima sobre a agricultura, durante longas séries de anos, são importantes nos níveis regional, estadual e nacional,

por seu impacto social e econômico. No entanto, esses estudos são difíceis de serem realizados experimentalmente, por causa da limitação de equipamentos, mão-de-obra e recursos financeiros (Andresen et al., 2001). Além disso, há dificuldade no controle de alguns fatores em experimentos, e as respostas da planta são afetadas por condições meteorológicas que variam no espaço e no tempo, ou seja, são diferentes de um local para outro e, em um mesmo local, variam a cada dia.

Modelos matemáticos são uma simplificação da realidade que nos permitem descrever as complicadas interações que existem em agroecossistemas e, assim, tornam possível o estudo do impacto de mudanças nos elementos meteorológicos e no clima sobre agroecossistemas. Existem vários modelos de simulação de rendimento das culturas agrícolas disponíveis na literatura, desde os mecanísticos de elevada complexidade e número de coeficientes (Stapper & Harris, 1989) até modelos empíricos simples (Monteith & Scott, 1982). Numa faixa intermediária de complexidade e número de coeficientes estão os modelos mecanísticos simplificados, que utilizam reduzido número de informações, são compostos por funções matemáticas robustas e podem ser usados para diversas situações. Os modelos de Sinclair (1986), Amir & Sinclair (1991) e Muchow & Sinclair (1991) se enquadram neste último tipo de modelo e foram utilizados neste estudo.

O trigo é a principal cultura de inverno, enquanto a soja e o milho são as principais culturas de sequeiro de verão do Estado do Rio Grande do Sul. Assim, este

trabalho teve por objetivo avaliar, por meio de estudo numérico, a existência de impacto da possível mudança climática sobre o rendimento das culturas do trigo, soja e milho, em Santa Maria, RS.

Material e Métodos

O estudo numérico foi realizado para as condições da região de Santa Maria, RS. Utilizaram-se os dados diários de temperatura máxima e mínima, brilho solar real e precipitação pluvial, coletados na Estação Climatológica Principal do 8º Distrito de Meteorologia, do Instituto Nacional de Meteorologia, localizada no campo experimental do Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria (29°43'S, 53°42'W, altitude de 95 m) de 1969 a 2003. A densidade de fluxo de radiação solar global incidente, necessária nos modelos de simulação do rendimento das culturas descritos mais adiante, foi estimada a partir do brilho solar, pela equação de Angstrom, com coeficientes mensais para Santa Maria apresentados em Estefanel et al. (1990).

Os cenários climáticos para os próximos 100 anos, utilizados na simulação, estão descritos na Tabela 1. Esses cenários foram criados com base em Siqueira et al. (2001). O cenário sem mudança climática consistiu de um conjunto de dados sintéticos de 100 anos, criados com o "weather generator" LARS-WG (Semenov et al., 1998), a partir dos dados observados no período de 1969 a 2003, cuja série (35 anos) é suficiente, pois é maior que o mínimo de 20 anos preconizado para usar o modelo (Semenov et al., 1998; Weiss et al., 2003).

Tabela 1. Cenários meteorológicos de mudança climática para a região de Santa Maria, RS, utilizados neste estudo numérico e valores do coeficiente de correlação de Kendall *tau* entre rendimento de grãos das culturas de trigo, soja e milho e anos nos cenários climáticos.

Cenário	Temperatura média do ar (°C)	CO ₂ (ppm)	Precipitação (%)				Valores de coeficiente de correlação Kendall <i>tau</i>		
			Dez.–Fev	Mar.–Maio	Jun.–Ago.	Set.–Nov.	Trigo	Soja	Milho
1	- ⁽¹⁾	350	-	-	-	-	0,170	0,006	0,022
2	-	700	-	-	-	-	0,421*	0,121	0,288*
3	+2°C	700	-	-	-	-	0,214*	0,051	-0,082
4	+3°C	700	-	-	-	-	0,069	0,035	-0,141
5	+4°C	700	-	-	-	-	-0,124	0,008	-0,195*
6	+5°C	700	-	-	-	-	-0,265*	-0,005	-0,257*
7	+6°C	700	-	-	-	-	-0,397*	-0,012	-0,298*
8	-	700	+7	+17	+4	+25	0,419*	0,144*	0,329*
9	+2°C	700	+7	+17	+4	+25	0,226*	0,085	-0,060
10	+3°C	700	+7	+17	+4	+25	0,083	0,061	-0,111
11	+4°C	700	+7	+17	+4	+25	-0,111	0,060	-0,176*
12	+5°C	700	+7	+17	+4	+25	-0,253*	0,040	-0,224*
13	+6°C	700	+7	+17	+4	+25	-0,386*	0,005	-0,267*

⁽¹⁾Sem modificações na precipitação ou temperatura. *Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

O LARS-WG é um modelo estocástico que tem sido usado em estudos de impacto de cenários de mudança climática sobre o desempenho de agroecossistemas (Weiss et al., 2003). Esse modelo estocástico pode gerar séries meteorológicas (que quando têm duração maior que 30 anos podem ser considerados séries climáticas), através de distribuições de probabilidade e correlações entre elementos meteorológicos que mantêm as estatísticas da série original, cujas estatísticas das séries climáticas geradas devem ser comparadas com as estatísticas da série de dados meteorológicos observados (Semenov et al., 1998; Weiss et al., 2003).

A comparação entre a série climática gerada pelo LARS-WG e a série de dados meteorológicos observados de 1969 a 2003 mostrou que não há diferença entre as estatísticas, tendo indicado que as séries de mudança climática geradas pelo LARS-WG podem ser usadas neste estudo. Os cenários com aumentos de temperatura e precipitação foram, então, criados com o LARS-WG, assumindo-se um aumento linear do início ao fim dos 100 anos. Foi considerado, também, um incremento de CO₂ de 350 ppm (situação atual) (Siqueira et al., 2000) até 700 ppm (situação de mudança climática) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1995).

Os valores do conteúdo de água no solo, na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), utilizados para a simulação, são da unidade de mapeamento São Pedro, um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico (Brasil, 1973) representativo da região (Nascimento, 1981).

O rendimento das culturas de trigo, soja e milho foi simulado pelos modelos de Amir & Sinclair (1991), Sinclair (1986) e Muchow & Sinclair (1991), respectivamente.

No modelo de Amir & Sinclair (1991), o desenvolvimento da cultura do trigo é dividido em três fases: da emergência ao crescimento da haste principal; do crescimento da haste principal à antese; e enchimento de grãos, com duração de 1.243, 212 e 585 graus-dia, respectivamente. Para o cálculo da soma térmica, em graus-dia (GD), a temperatura base (T_b) utilizada foi de 0°C para todo o ciclo, e a temperatura média diária foi calculada a partir da média aritmética das temperaturas mínima e máxima diárias. Optou-se por usar a mesma T_b para todo o ciclo de desenvolvimento do trigo, por ser a pressuposição usada no modelo de Amir & Sinclair (1991).

O número final de folhas na haste principal e o acúmulo térmico entre o aparecimento de duas folhas sucessivas (filocrono) de trigo, necessários para o modelo de Amir & Sinclair (1991), foram de 11 folhas e 113 GD (Streck et al., 2005), respectivamente, para a cultivar BRS 179, genótipo de trigo recomendado para a Região Sul do Brasil.

No modelo sobre a soja (Sinclair, 1986), as datas de término de crescimento foliar e início do enchimento de grãos foram simuladas com o modelo não-linear de resposta do desenvolvimento, à temperatura e fotoperíodo propostos por Sinclair et al. (1991), utilizando-se dados da cultivar Bragg publicados em Schneider et al. (1984), para a estimativa dos coeficientes nas condições locais. No modelo sobre o milho, os coeficientes foram os mesmos de Muchow & Sinclair (1991).

A simulação foi iniciada no dia 1º de janeiro do ano 1 e finalizada no dia 31 de dezembro do ano 100. As datas de semeadura foram 14 de junho, para o trigo, e 15 de novembro para a soja e o milho, datas essas que estão dentro da época recomendada para essas culturas na região central do Rio Grande do Sul. Considerou-se que, durante o período de pousio, não havia vegetação em crescimento ativo sobre a superfície do solo, e os restos culturais permaneceram sobre a superfície depois da colheita.

O dia da colheita de cada cultivo foi considerado como o dia após aquele em que o acúmulo térmico foi de 233 GD ($T_b = 5^\circ\text{C}$), depois da maturação fisiológica. Caso tenha ocorrido precipitação acima de 5 mm, no dia em que os 233 GD foram completados, esperou-se dois dias após o último dia de chuva, para o estabelecimento do dia da colheita.

O cálculo da decomposição dos restos culturais, após a colheita, foi baseado nas equações propostas por Ghidey et al. (1985). A presença de resíduo sobre a superfície resulta na atenuação da perda de água por evaporação. A diminuição da evaporação de água do solo, proporcionada pelos resíduos culturais, foi calculada pela equação apresentada em Gill & Jalota (1996).

A resposta das culturas ao aumento de CO₂ atmosférico foi considerada, modificando-se a eficiência do uso da radiação (EUR) e a eficiência do uso da água (EUA). A modificação na EUA foi realizada pela redução da transpiração nas culturas em ambiente com elevado CO₂ (Gottschalck et al., 2001). A transpiração foi reduzida em 23% no trigo (Cure & Acock, 1986) e 38 e 40% nas culturas de soja e milho, respectivamente (Gottschalck et al., 2001). Para o cálculo da biomassa

e rendimento do trigo, a EUR utilizada foi de $0,9 \text{ g MJ}^{-1}$ (Moreira et al., 1999), para o cenário sem mudança climática. Utilizou-se aumento total de 25% na EUR, nas culturas do trigo e soja, e de 10% na cultura do milho (Tubiello et al., 2000). O aumento foi proporcional e linear do ano 1 ao ano 100.

Para verificar se o cenário sintético de 100 anos sem mudança climática tem as mesmas estatísticas da série de dados observados, o teste estatístico foi realizado pelo programa LARS-WG. Para a análise da tendência da série de dados, dos cenários de mudança climática, foi utilizado o teste não-paramétrico de Kendall *tau*, que testa a significância das tendências. Dados de rendimento médio de trigo, soja e milho de todo o Estado do Rio Grande do Sul, do período de 1990 a 2003 (Conab, 2004), foram utilizados como dados independentes, para testar os modelos de rendimento das culturas usados no estudo. Foram calculados os desvios de rendimentos simulados e observados como sendo a diferença entre rendimento da safra e a média do período (1990 a 2003). A comparação entre a média de rendimento simulado e observado foi efetuada pelo teste t pareado, metodologia já utilizada em trabalhos semelhantes a este (Andresen et al., 2001). Além do teste t pareado, foi realizado também o teste não paramétrico de Spearman R entre médias de rendimento simulados e observados.

Resultados e Discussão

Alguns dos cenários climáticos, gerados e utilizados no estudo, como os cenários sem aumento de temperatura e com aumento de 3 e 6°C na temperatura média anual (Figura 1 A) e os cenários sem aumento e com aumento de precipitação pluvial acumulada anual (Figura 1 B), mostram um aumento gradual dos dois elementos meteorológicos até atingir o aumento total no final do século. Os outros cenários de aumento de temperatura foram intermediários entre sem aumento e com aumento de temperatura de 6°C.

As médias dos rendimentos de trigo, soja e milho simulados e observados no período de 1990 a 2003 não diferiram significativamente pelo teste t pareado ($p = 0,05$). A correlação entre rendimento observado e simulado pelo teste de Spearman R para as culturas do trigo, soja e milho foi de $R = 0,51$ ($p = 0,074$), $R = 0,79$ ($p = 0,001$) e $R = 0,56$ ($p = 0,044$), respectivamente, valores que foram considerados suficientes para rejeitar a hipótese H_0 (correlação não-significativa) e aceitar a hipótese H_1 (correlação significativa).

Esses dois testes estatísticos nos permitem concluir que os modelos de simulação do rendimento das três culturas podem ser usados para a finalidade do presente estudo (Andresen et al., 2001). De modo geral, os desvios de rendimentos simulados são maiores do que os desvios de rendimentos observados (Figura 2). Isto é esperado, pois os dados observados são o rendimento médio de uma região (Estado do Rio Grande do Sul), enquanto que os dados simulados pelos modelos matemáticos são pontuais para um local (Andresen et al., 2001). Na Figura 2, os desvios de rendimentos simulados seguem a mesma tendência dos desvios de rendimentos observados, pois a maioria dos desvios negativos e positivos de rendimentos de grãos simulados e observados coincide.

A simulação do rendimento de grãos de trigo, para o cenário sem mudança climática, evidenciou pequeno acréscimo no rendimento do trigo (Figuras 3 e 4), porém não-significativo ($p < 0,01$) pelo coeficiente de correlação de Kendall *tau* (Tabela 1). Nos cenários com mudança climática, aumentos de temperatura de 3 e 4°C (cenários 4, 5, 10 e 11) anularam os efeitos positivos do aumento de CO_2 sobre o rendimento de grãos de trigo. Um aumento de CO_2 e de temperatura de 2°C, com aumento e sem

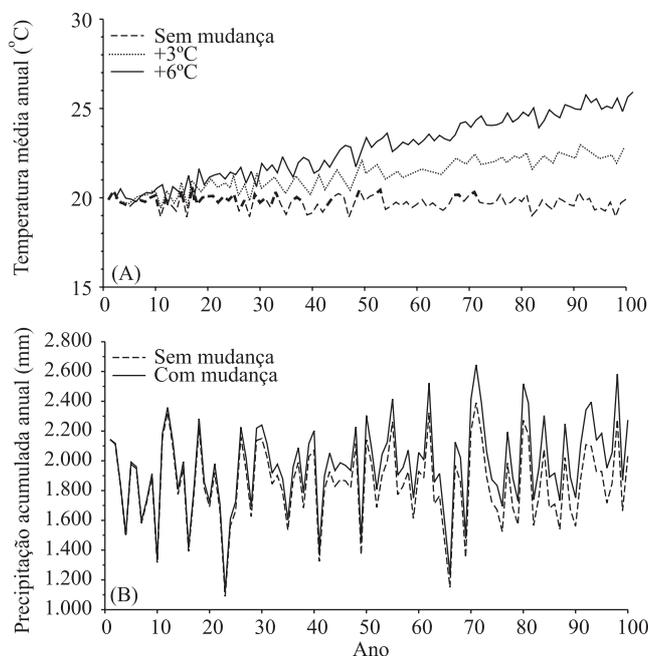


Figura 1. Cenários climáticos de temperatura média anual (A) e precipitação acumulada anual (B), simulados para o período de 100 anos, em Santa Maria, RS.

aumento de precipitação pluvial (cenários 2, 3, 8 e 9) promoveu um aumento significativo no rendimento de grãos de trigo (Tabela 1). Os aumentos de 5 e 6°C

(cenários 6, 7, 12 e 13) diminuíram significativamente o rendimento de grãos de trigo. Isto demonstra os efeitos favoráveis do aumento de CO₂ na cultura do trigo, para

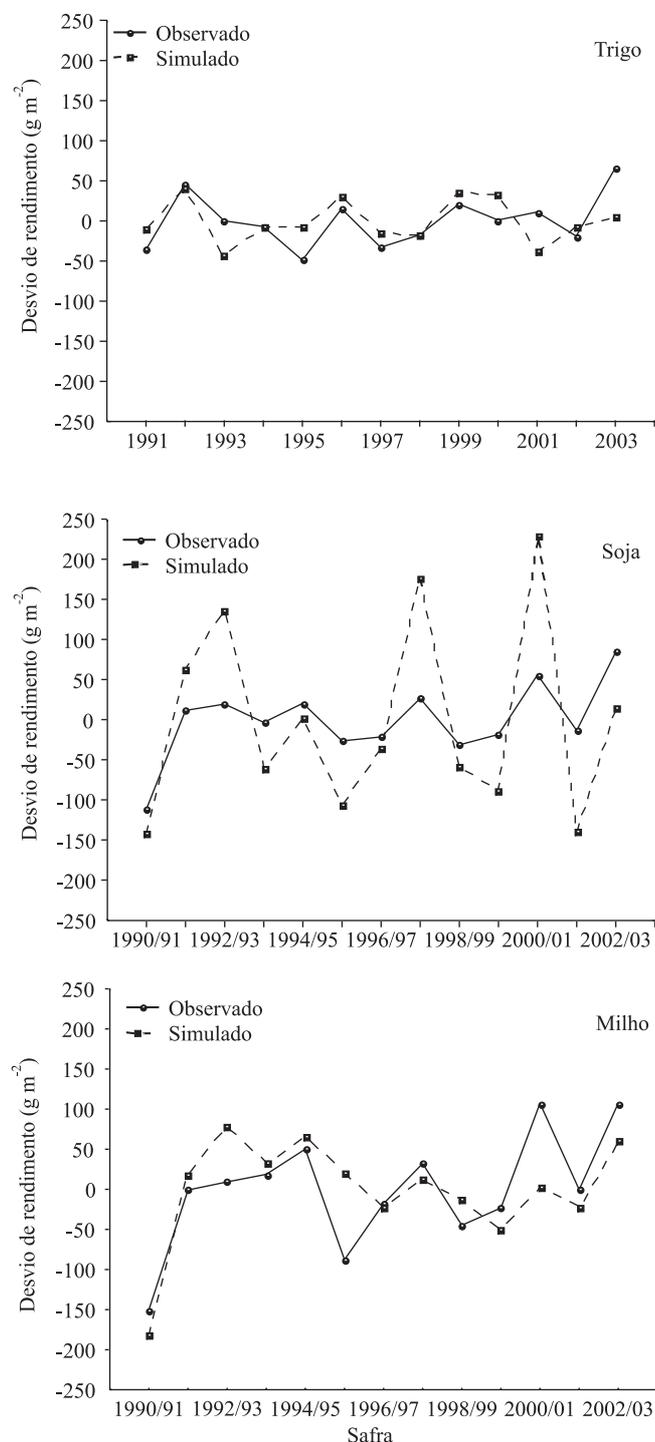


Figura 2. Desvios de rendimentos de grãos de trigo, soja e milho, observados e simulados, em Santa Maria, RS, de 1990 a 2003.

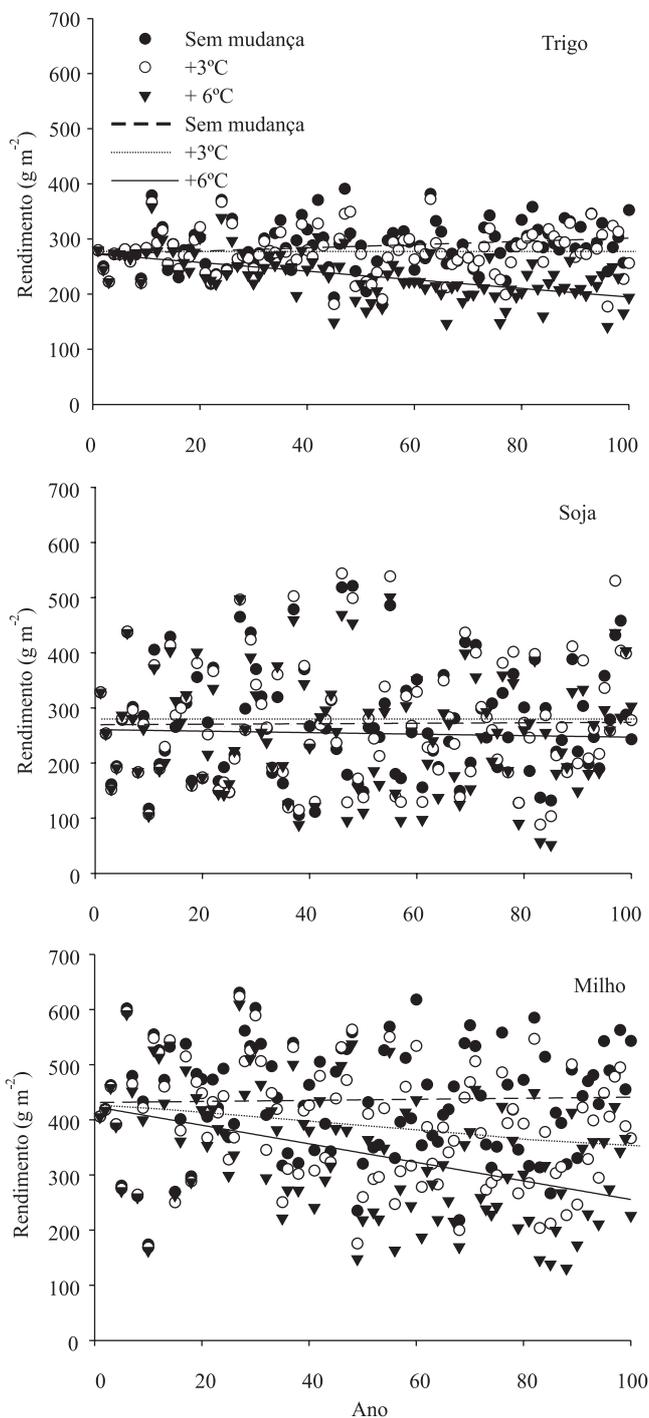


Figura 3. Rendimento de grãos das culturas de trigo, soja e milho, simulado em cenários sem mudança climática e com aumento de 3 e 6°C na temperatura média do ar, sem aumento na precipitação, em Santa Maria, RS.

aumentos na temperatura do ar de até 2°C, e os efeitos deletérios sobre a mesma em aumentos acima de 5°C.

Para a cultura da soja, houve correlação significativa e positiva ($p < 0,01$), entre rendimento de grãos e anos, apenas para o cenário 8 (aumento de CO₂ sem

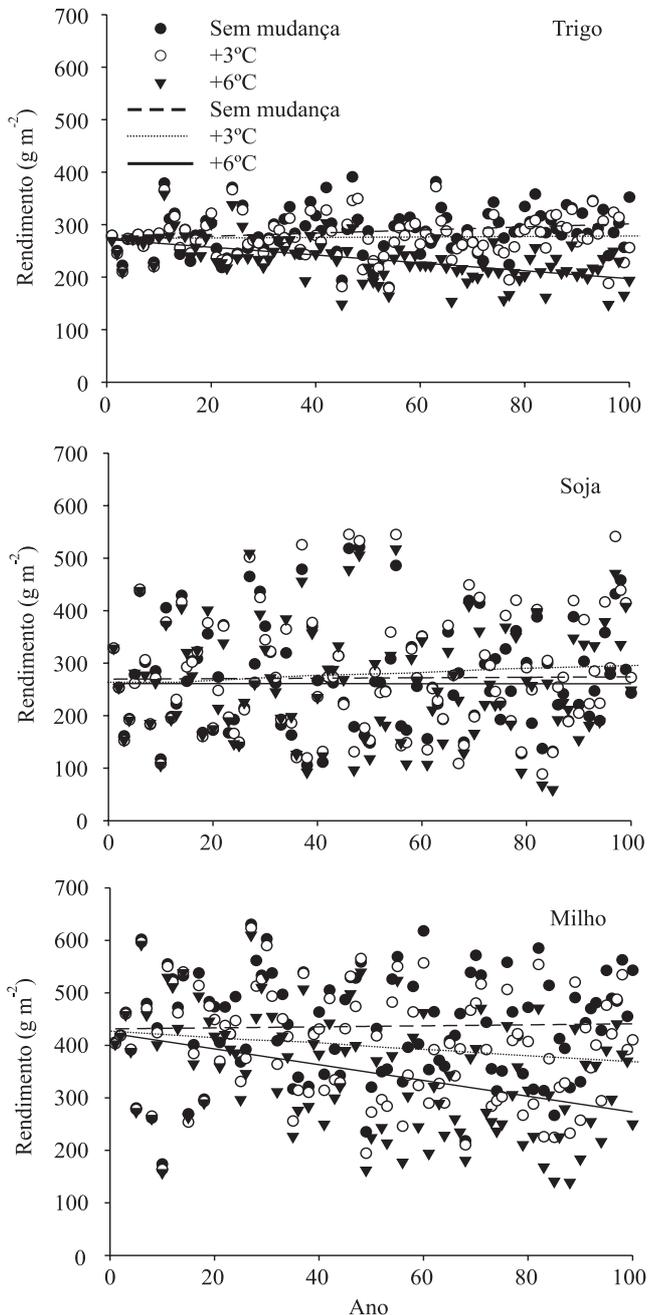


Figura 4. Rendimentos de grãos simulados para as culturas de trigo, soja e milho, em cenários sem mudança climática e com aumento de 3 e 6°C na temperatura média do ar, com aumento na precipitação pluvial (PP), em Santa Maria, RS.

aumento de temperatura e com aumento na precipitação pluvial, Tabela 1). Na cultura do milho, o rendimento de grãos simulado teve correlação positiva significativa ($p < 0,01$) com anos, nos cenários 2 e 8, ou seja, aumento de CO₂ sem aumento na temperatura do ar. Aumentos de temperatura de 2 e 3°C (cenários 3, 4, 9 e 10) tendem a anular o efeito positivo do aumento de CO₂ no rendimento de grãos de milho, enquanto que aumentos de 4°C ou mais (cenários 5, 6, 7, 11, 12 e 13) causam redução no rendimento de grãos de milho ($p < 0,01$).

Na Figura 5, estão descritas as mudanças relativas no rendimento simulado de grãos das culturas, em cada cenário climático, em relação à média de rendimento de grãos simulada nos últimos dez anos do cenário sem mudança climática (cenário 1, Tabela 1), para os últimos dez anos de cada série. Para a cultura do trigo, observa-se forte tendência de decréscimo no rendimento no final do século, à medida que a temperatura aumenta, independentemente de a precipitação aumentar ou não. Os desvios do rendimento de trigo são positivos até um

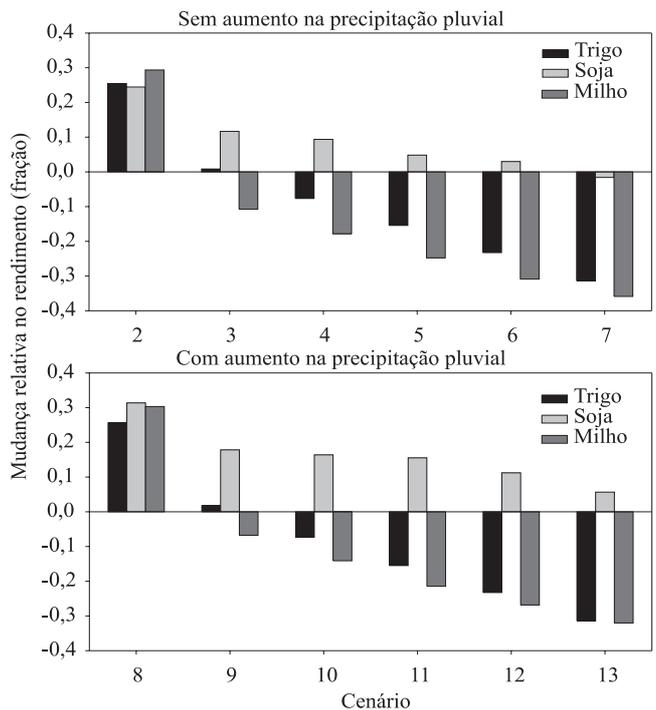


Figura 5. Mudança relativa no rendimento de grãos simulado para as culturas de trigo, soja e milho em diferentes cenários climáticos, com aumento de CO₂ em relação ao cenário sem mudança climática, para Santa Maria, RS. As barras representam a média dos últimos dez anos de cada cenário descrito na Tabela 1.

aumento de 3°C. Aumentos de temperatura do ar acima de 3°C anularam os efeitos positivos do aumento de CO₂ sobre o rendimento de trigo e causaram desvios negativos no rendimento de grãos. O menor rendimento do trigo foi obtido no cenário com aumento de 6°C na temperatura e sem mudança na precipitação pluvial (-0,31), e o maior rendimento foi obtido no cenário com aumento de CO₂ e precipitação, sem aumento de temperatura do ar (0,26).

Para a cultura da soja, observou-se redução dos desvios de rendimento com aumento de temperatura, mas apenas um aumento de 6°C (cenário 7) causaria um desvio negativo (-0,01). O maior rendimento de grãos de soja, em relação ao cenário sem mudança climática, foi obtido no cenário com aumento de CO₂ e precipitação, sem aumento de temperatura do ar (0,31).

Cenários com aumento de temperatura do ar reduziram o rendimento de grãos de milho, quando comparados com o cenário que considerou somente o aumento de CO₂ (Figura 5). O maior aumento de rendimento de grãos de milho foi simulado para o cenário 8 (0,30), e a maior diminuição de rendimento de grãos foi obtido no cenário 7 (-0,36).

A principal causa da diminuição do rendimento de grãos das culturas é o encurtamento do ciclo de desenvolvimento, em cenários com aumentos de temperatura (Siqueira et al., 2000, 2001). No entanto, a deficiência hídrica no solo também contribuiu para reduzir o rendimento de grãos de soja e milho, uma vez que nos cenários com acréscimo de precipitação pluvial, a redução no rendimento é pouco menor do que nos cenários com aumento de temperatura sem nenhum acréscimo na precipitação pluvial (Figura 5). Para a cultura do trigo, não houve efeito do acréscimo na precipitação sobre o rendimento, pois essa cultura tem seu ciclo durante os meses de final de outono, inverno e primavera, quando a umidade do solo não é limitante.

Os resultados deste estudo concordam com os de estudos realizados em outros locais. Streck (2005) revisou a literatura e concluiu que um aumento de CO₂ de duas vezes a concentração atual, sem aumento de temperatura, leva a um aumento de rendimento em torno de 30 e 10% para culturas C₃ e C₄, respectivamente. No entanto, se o aquecimento global acontecer, um aumento de 1°C pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ (Streck, 2005). Siqueira et al. (2000) projetaram para a Região Sul do Brasil diminuição de

20 e 8% no rendimento de trigo e milho, respectivamente. Esses mesmos autores projetaram aumento de 30% no rendimento da soja, o que indica que essa espécie seria mais beneficiada pelo aquecimento global, o que não foi verificado neste estudo.

Ainda existem muitas incertezas sobre quanto seria a mudança climática até o final deste século. O aumento de CO₂ atmosférico parece ser inevitável, pois a queima de combustíveis fósseis não deve diminuir em nível global a curto e médio prazo. Essa injeção de CO₂ na atmosfera terrestre pode ser benéfica para a agricultura, já que a atual concentração de CO₂ mundial (em torno de 360 mol mol⁻¹) é insuficiente para saturar a ribulose 1,5-bifosfato carboxilase (Rubisco), a enzima responsável pela carboxilação primária em plantas C₃, como a soja e o trigo (Taiz & Zeiger, 1991). A fotossíntese em plantas C₃ aumenta até uma concentração de CO₂ de 800–1.000 mol mol⁻¹ (Amthor, 2001).

Há dúvidas sobre até que ponto as possíveis modificações, conseqüentes de aumento de CO₂, com aumento de temperatura e modificação em outros elementos meteorológicos, poderão afetar o efeito positivo do aumento de CO₂ sobre o crescimento vegetal. A comunidade científica tem buscado responder a esses questionamentos. A limitação ainda é que a grande maioria dos estudos é feita com modelos matemáticos, que embora calibrados e testados, são uma simplificação da realidade, por mais complexos que sejam. Os resultados deste trabalho devem, portanto, ser interpretados como tendências e não como verdades absolutas.

Como tendência, este estudo se une a muitos outros anteriores que apontam que os efeitos positivos do aumento de CO₂, sobre o rendimento de grãos das principais culturas agrícolas, podem ser anulados pelo aquecimento global, se este vier a acontecer. Medidas de adaptação do setor primário a esse futuro desafio são muito mais difíceis em países e regiões menos desenvolvidas (Fuhrer, 2003; Streck, 2005), o que aumenta a responsabilidade da comunidade científica, na busca de alternativas tecnológicas, que auxiliem na mitigação dos possíveis impactos da mudança climática sobre os agroecossistemas.

Conclusões

1. A mudança climática projetada pela simulação, para os próximos 100 anos, em Santa Maria, RS, influenciará no rendimento das culturas de trigo, soja e milho.

2. O aumento na temperatura do ar de 3, 6 e 2°C pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ no rendimento das culturas de trigo, soja e milho, respectivamente.

Referências

- AMIR, J.; SINCLAIR, T.R. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, v.28, p.59-69, 1991.
- AMTHOR, J.S. Effects of atmospheric CO₂ on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. **Field Crops Research**, v.73, p.1-34, 2001.
- ANDRESEN, J.A.; ALAGARSWAMY, G.; ROTZ, C.A.; RITCHIE, J.T.; LeBARON, A.W. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the Great Lakes region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, v.93, p.1059-1070, 2001.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p. (DNPEA. Boletim técnico, 30).
- BUTTERFIELD, R.E.; MORISON, J.I.L. Modeling the impact of climatic warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.62, p.241-261, 1992.
- CONAB. **Safras**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 18 dez. 2004.
- CURE, J.D.; ACOCK, B. Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.38, p.127-145, 1986.
- ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F.M.; BERLATO, M.A.; BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B. Insolação e radiação solar em Santa Maria, RS. I. Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.20, p.203-218, 1990.
- FUHRER, J. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.97, p.1-20, 2003.
- GHIDEY, F.; GREGORY, J.M.; McCARTY, T.R.; ALBERTS, E.E. Residue decay evaluation and prediction. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.28, p.102-105, 1985.
- GILL, B.S.; JALOTA, S.K. Evaporation from soil in relation to residue rate, mixing depth, soil texture and evaporativity. **Soil Technology**, v.8, p.293-301, 1996.
- GOTTSCHALCK, J.C.; GILLIES, R.R.; CARLSON, T.N. The simulation of canopy transpiration under doubled CO₂: the evidence and impact of feedbacks on transpiration in two 1-D soil-vegetation-atmosphere-transfer models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.106, p.1-21, 2001.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change: the IPCC scientific assesment**. Cambridge: University Press, 1995. 288p.
- MONTEITH, J.L.; SCOTT, R.K. Weather and yield variation of crops. In: BLAXTER, K.; FOWDEN, L. **Food, nutrition and climate**. Englewood Cliffs: Applied Science, 1982. p.127-149.
- MOREIRA, A.M.; ANGULO FILHO, R.; RUDORFF, B.F.T. Eficiência do uso de radiação e índice de colheita em trigo submetido a estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento. **Scientia Agricola**, v.56, p.597-603, 1999.
- MUCHOW, R.C.; SINCLAIR, T.R. Water deficit effects on maize yields modeled under current and "greenhouse" climates. **Agronomy Journal**, v.83, p.1052-1059, 1991.
- NASCIMENTO, J.L. do. **Características de umidade e disponibilidade de água do solo da unidade São Pedro, RS**. 1981. 56p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- SCHNEIDER, F.M.; STEINDORF, A.P.; HELDWEIN, A.B.; BURIOL, G.A.; SACCOL, V.A.; RIGHES, A.A.; KÖNIG, O.; MANFRON, P.A. Comportamento de doze cultivares de soja à diferentes condições de drenagem e de irrigação subterrânea num solo hidromórfico. In: CONTRIBUIÇÃO do Centro de Ciências Rurais à XII reunião de pesquisa de soja da Região Sul. Santa Maria: UFSM; Fatec, 1984. p.29-42.
- SEMENOV, M.A.; BROOKS, R.J.; BARROW, E.M.; RICHARDSON, C.W. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. **Climate Research**, v.10, p.95-107, 1998.
- SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. **Field Crops Research**, v.15, p.125-141, 1986.
- SINCLAIR, T.R.; KITANI, S.; HINSON, K.; BRUNIARD, J.; HORIE, T. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. **Crop Science**, v.31, p.786-790, 1991.
- SIQUEIRA, O.J.F.; FARIAS, J.R.B.; SANS, L.M.A. Potential effects of global climate changes for Brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.2, p.115-129, 1994.
- SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; FERREIRA, M.F. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, p.311-320, 2000.
- SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L.A.B. de. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p.33-63.

- STAPPER, M.; HARRIS, H.C. Assessing de productivity of wheat genotypes in a Mediterranean climate, using a crop simulation model. **Field Crops Research**, v.20, p.129-152, 1989.
- STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmosferic CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, p.734-744, 2005.
- STRECK, N.A.; BOSCO, L.C.; MENEZES, N.L.; GARCIA, D.C.; ALBERTO, C.M.; LAGO, I. Estimativa do filocrono em cultivares de trigo de primavera. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, p.423-429, 2005.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Redwood City: Benjamin/Cummings Pub. Co., 1991. 559p.
- TUBIELLO, F.N.; DONATELLI, M.; ROSENZWEIG, C.; STOCKLE, C.O. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v.13, p.179-189, 2000.
- WEISS, A.; HAYS, C.J.; WON, J. Assessing winter wheat response to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. Great Plains. **Climatic Change**, v.58, p.119-147, 2003.

Recebido em 8 de junho de 2005 e aprovado em 9 de junho de 2006