

Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho

Leandro Galon¹, Siumar Pedro Tironi², Anilza Andréia da Rocha², Edimar Rodrigues Soares³, Germani Concenço⁴ e Cleber Maus Alberto¹

Resumo - Os impactos dos fatores abióticos nos agroecossistemas agrícolas são considerados elementos causadores de alguma limitação na produção. Vários estudos foram e estão sendo realizados para quantificar e buscar saídas para minimizar os efeitos desses fatores na produtividade do milho, pois estes efeitos aliados a fatores fisiológicos, genéticos e de manejo exercem significativa influência na produtividade da cultura. O objetivo da revisão foi descrever a influência dos fatores abióticos, como estresse hídrico, temperatura, radiação, nutrientes e CO₂, na produtividade da cultura do milho. Os efeitos são mais severos quanto maior o período de persistência destes fatores e, dependendo da fase fenológica da cultura, considerando que com atuação simultânea de dois ou mais fatores abióticos há potencialização dos efeitos causado por estes. Também, dependendo do híbrido de milho cultivado tem-se respostas diferenciadas a estes agentes, os programas de melhoramento de milho buscam genótipos com características de maior adaptação, ou seja, com menor suscetibilidade a fatores adversos. O fator abiótico déficit hídrico é considerado como o maior limitante na produção do milho. No entanto, outros também tornar-se-ão importantes principalmente se ocorrerem em conjunto e somados ainda às mudanças climáticas, que podem modificar o desempenho produtivo desta cultura.

Palavras-chave: *Zea mays*, recursos ambientais, adaptação, híbridos.

Influence of abiotic factors on corn yield

Abstract - The impacts of abiotic factors in agricultural agroecosystems are considered elements that lead to some restrictions on production. Several studies have been done and are still being conducted to quantify and seek for escapes to minimize the effects of these factors on corn productivity, because these effects, combined with physiological, genetic and management factors exert significant influence on productivity. The objective of the review was to describe the influence of abiotic factors such as drought stress, temperature, radiation, nutrients and CO₂ in corn productivity. The effects are more severe the higher the period of persistence of these factors and depend on the phenological stage of the crop, whereas with simultaneous action of two or more abiotic factors there is a potentiation of the effects caused by them. Also, depending on the cultivated corn hybrid, there are different responses to these agents, breeding programs seek to improve corn genotypes with wider adaptation characteristics, that is, with less susceptibility to adverse factors. Water deficit is considered the most important abiotic factor limiting corn production. However, others also will become especially important if they occur together and added to climate change, which may alter the productive performance of this crop.

Keywords: *Zea mays*, environmental resources, adaptation, hybrids.

INTRODUÇÃO

O milho é um dos cereais mais importantes como fonte de energia para humanos e animais, destacando-se como uma das culturas de maior produção de grãos (FAO, 2008). No Brasil, o milho ocupa o segundo lugar em termos de produção (CONAB, 2008), tendo grande importância como matéria-prima para uma infinidade de produtos e co-produtos, onde somente na cadeia produtiva de suínos e aves são consumidos entre 70 a 80% dos grãos produzidos no país (Duarte et al., 2006). A produção da cultura tende a se expandir consideravelmente para suprir a demanda gerada em função do crescimento populacional e, principalmente, pelo aumento do consumo do cereal para a fabricação de energia renovável (Silva, 2004) como etanol, por exemplo. Nos Estados Unidos da América, em função do programa de produção de etanol, está ocorrendo um elevado consumo interno, reduzindo significativamente as exportações. Este que representa mais de 50% do montante

Recebido em 27 de Fevereiro de 2010, aceito em 03 de novembro de 2010

¹ Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Itaqui-RS, Rua Luiz Joaquim de Sá Britto, s/n, Bairro Promorar - Itaqui - RS, CEP: 97650-000. E-mail: leandrogalon@unipampa.edu.br.

² Universidade Federal de Viçosa - DFT/UFV, Rua Getúlio Vargas, 169, Bairro Bom Jesus - Viçosa-MG, CEP.: 36570-000. E-mail: siumar.tironi@gmail.com.

³ Faculdade da Amazônia (FAMA), Rua 703, número 2043, Bairro Cristo Rei, Vilhena-RO, CEP.: 76980-000. E-mail: eadaagronomiaies@hotmaail.com.

⁴ Embrapa Agropecuária Oeste - CPAO. E-mail: gconcenço@yahoo.com.br.

comercializado internacionalmente (Duarte et al., 2006). O milho é uma cultura popularmente conhecida, sendo produzida em uma grande diversidade de solos, clima e variadas tecnologias de manejos culturais (EMBRAPA, 2006).

Embora o milho responda à interação de todos os elementos climáticos, pode-se considerar que a radiação solar, a precipitação e a temperatura são os que mais influenciam, pois atuam diretamente nas atividades fisiológicas, interferindo na produção de matéria seca e de grãos (Sans et al., 2006; Brachtvogel et al., 2009). Por pertencer ao grupo de plantas C_4 , a cultura do milho responde com elevadas produtividades ao aumento da quantidade de radiação solar, por possuir mecanismo fotossintético que utiliza o CO_2 com mais eficiência. Porém, a eficiência do dossel não é maior que 10% (Fancelli & Dourado-Neto, 2004).

Fatores ambientais se referem basicamente a componentes climáticos e edáficos, cujos efeitos podem influenciar direta ou indiretamente no potencial produtivo das culturas. Considera-se que destes efeitos, os elementos climáticos são os mais impactantes na produção de milho, mesmo empregando-se alto nível tecnológico no manejo (Agenta et al., 2003).

A cultura do milho tem demonstrado variabilidade genética para responder às pressões de seleção para os mais variados caracteres e nas mais variadas condições ambientais (Sans et al., 2006; Cargnelutti Filho et al., 2009). No entanto, segundo Andrade (1995), ainda que o milho apresente elevado potencial produtivo, apresenta sensibilidade acentuada a estresse de natureza abiótica, que aliada a sua pequena plasticidade foliar, reduzida prolificidade e baixa capacidade de compensação efetiva, seu cultivo necessita ser rigorosamente planejado. Assim, a adoção de manejo criterioso, objetivando a manifestação de sua capacidade produtiva torna-se um fator de relevada importância. A habilidade individual das plantas de milho em buscar os recursos escassos para seu crescimento e desenvolvimento como luz, água e nutrientes, determina o sucesso desta espécie no ambiente (Andrade, 1995).

Com esta revisão bibliográfica, objetivou-se explorar alguns fatores abióticos que direta ou indiretamente podem ocasionar influência negativa sobre a cultura do milho, e deste modo, limitar o potencial produtivo de grãos.

Fatores abióticos

Caracterização dos fatores abióticos

De acordo com Radosevich et al. (1997) fatores abióticos são conseqüências da atuação de elementos não vivos do ambiente sobre uma comunidade de plantas e que podem gerar algum tipo de estresse, de maneira direta ou indireta, sendo eles ligados, principalmente a elementos climáticos e/ou edáficos.

Alguns fatores abióticos estressantes podem interferir na produtividade ainda no início do ciclo de desenvolvimento da cultura, reduzindo o acúmulo de fitomassa, velocidade de crescimento e conseqüentemente a produtividade (Castro & Garcia, 1996; Ni et al., 2000). Para grande maioria das culturas os efeitos dos fatores abióticos é maior na fase reprodutiva, mais especificamente no florescimento. As influências causadas pelos fatores abióticos são potencializadas quando há atuação de dois ou mais fatores simultaneamente. Serão abordados nesta revisão a influência do estresse hídrico, temperatura, radiação solar, nutrientes e concentração de CO_2 na produtividade de grãos da cultura do milho.

ESTRESSE HÍDRICO

Déficit hídrico

A cultura do milho exige um mínimo de 400-600 mm de precipitação pluvial para que possa manifestar seu potencial produtivo, porém este volume é variável, principalmente em função da

região de cultivo e das condições edafoclimáticas. O consumo de água geralmente oscila entre 4 a 6 mm dia⁻¹ (Fancelli & Dourado-Neto, 2004). Em uma região tropical, 500 mm pode ser suficiente, mas em uma área com baixa umidade relativa o requerimento pode exceder a 900 mm (Doorenbos & Kassam, 1979). O volume de precipitação não é considerado como bom indicador de disponibilidade hídrica para a cultura, pois esta depende do padrão de distribuição das chuvas, tipo de solo, umidade relativa do ar, entre outros fatores que interferem na retenção de água no solo e evapotranspiração da cultura.

No início do ciclo de desenvolvimento da cultura, a ocorrência de curtos períodos de deficiência hídrica pode estimular o crescimento radicular das plantas. Assim, a planta pode explorar um volume maior de solo, absorvendo mais eficientemente água e nutrientes (Fancelli & Dourado-Neto, 2000).

No Brasil, estima-se que 14,8% da área plantada com milho seja afetada pela deficiência hídrica, equivalendo a 1,9 milhões de hectares. Tal fato ocasiona uma perda na produção de grãos de mais de 3,7 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2006).

A magnitude dos efeitos do déficit hídrico sobre a produtividade de grãos de milho está relacionada ao período, duração, intensidade de ocorrência deste fator e da capacidade genética da planta em responder às mudanças do meio (Fancelli & Dourado-Neto, 2000). O período de florescimento é considerado como o estágio mais sensível e determinante do potencial produtivo, podendo ocorrer limitações superiores a 50% quando o déficit hídrico ocorrer nessa fase (Durães et al., 2002; 2004) constataram haver forte correlação entre precipitação ocorrida no ciclo reprodutivo e produtividade de grãos. Entretanto, houve correlação superior quando as precipitações ocorreram durante todo o ciclo da cultura. Na fase de formação dos componentes do rendimento de grãos (o número de espiga, número de grãos por espiga, número de fileiras de grãos, peso de espiga e peso de grãos) é considerado como menos crítico à falta de água, mas importante para o tamanho do grão. Após a maturidade fisiológica, a água tem pouca influência na produtividade de grãos (Doorenbos & Pruitt, 1975).

A resposta mais significativa das plantas ao déficit hídrico consiste no fechamento dos estômatos, da aceleração da senescência das folhas e decréscimo do crescimento da área foliar (Taiz & Zeiger, 2009). Quando as plantas são expostas a situações de déficit hídrico exibem, frequentemente, respostas fisiológicas que resultam, de modo indireto, na conservação da água no solo, economizando esta para períodos posteriores. Assim, a condutância estomática tem relação direta com o nível de disponibilidade hídrica no solo (Bianchi et al., 2007). Ressalta-se que a resposta ao déficit hídrico ocorre redução da taxa de expansão foliar das plantas de milho e uma diminuição da taxa fotossintética com a diminuição do potencial de água na folha (Figura 1).

As principais funções da água são manter o turgor e refrigeração dos tecidos (Floss, 2008). A importância da manutenção do turgor das células é permitir a continuidade dos processos de crescimento vegetal, expansão, divisão celular e fotossíntese, bem como todos os outros processos bioquímicos que são dependentes de água como soluto. Páez et al. (1995) demonstraram que a expansão da célula foi o processo mais sensível ao déficit hídrico, seguido de menor expansão foliar, transpiração e translocação de assimilados. Na Figura 2 tem-se um resumo dos principais processos fisiológicos e metabólicos afetados pela falta ou déficit de água na planta.

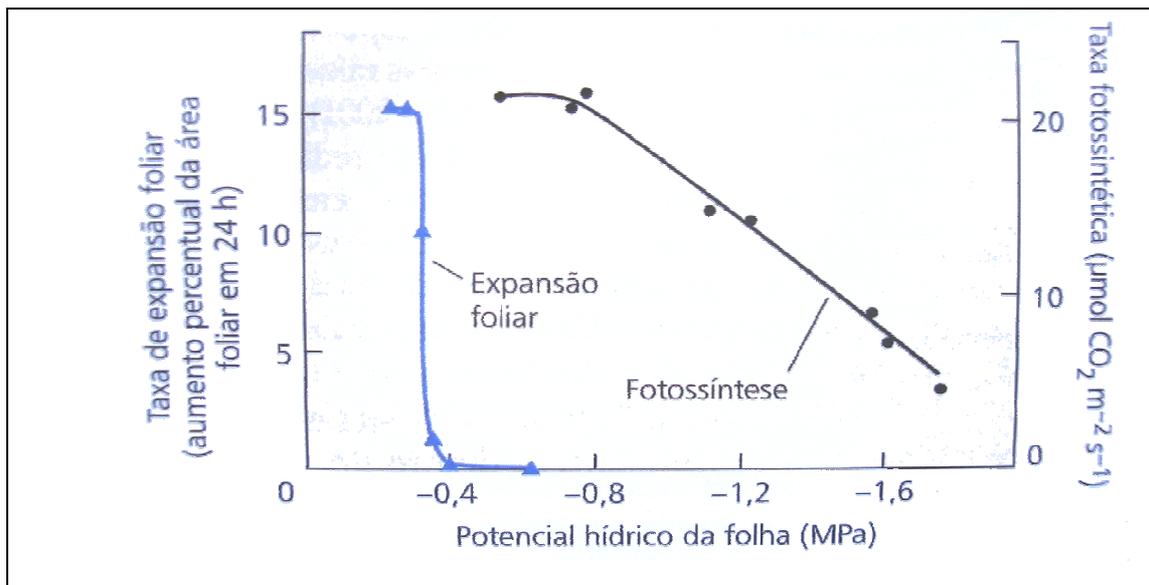


Figura 1. Efeito do estresse hídrico sobre a fotossíntese e a expansão foliar de plantas de milho. Fonte: Adaptado de Taiz & Zeiger (2009).

As oscilações nas safras de milho, as principais regiões produtoras do Brasil, estão associadas principalmente à disponibilidade de água, sobretudo no período crítico da cultura, que vai do pendoamento ao início do enchimento de grãos (Bergamaschi et al., 2004). Limitações na produtividade de grãos de milho são frequentes e intensas, principalmente nas propriedades que não dispõem de irrigação. Mesmo quando adotadas tecnologias de ponta pelos produtores como uso de insumos, sementes de qualidade e manejo correto da lavoura não há possibilidade de reversão no quadro. Conforme o exposto na Figura 3, a utilização de irrigação aumentou significativamente a produtividade de grãos da cultura do milho (Matzenauer et al., 2002; Bergamaschi et al., 2004).

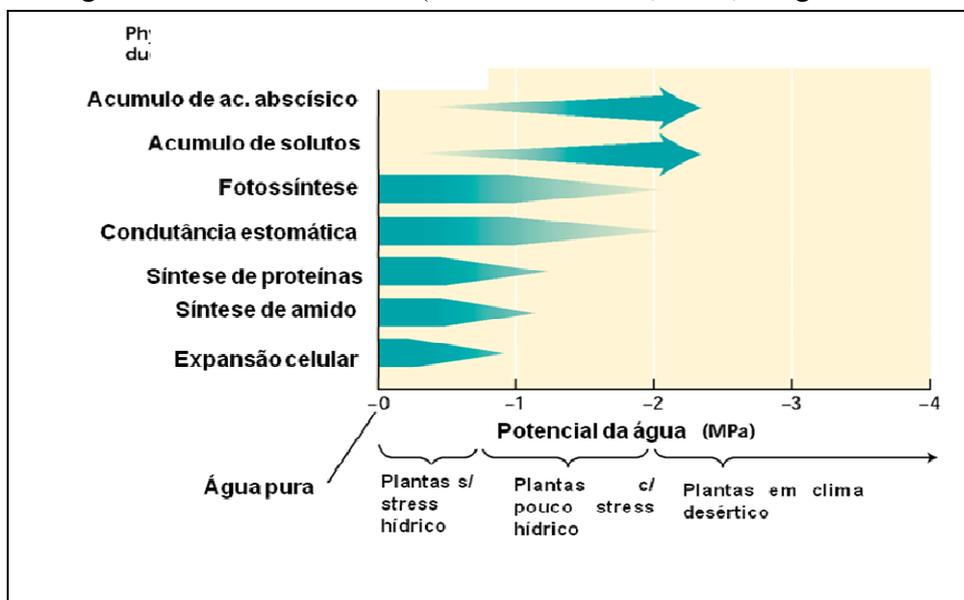


Figura 2. Alterações fisiológicas ou metabólicas em função do déficit de água em plantas. Fonte: Adaptado de Taiz & Zaiger (2009).

Em função do metabolismo e da própria fisiologia, as espécies C_4 são mais eficientes no uso da água, apresentando menor transpiração para uma dada taxa fotossintética e, em consequência produzem mais biomassa por unidade de água consumida. A cultura do milho, quando comparada com cereais de metabolismo C_3 apresenta maior eficiência no uso da água (E_w), com formação de 3

a 4 g de matéria seca kg^{-1} H_2O consumida, enquanto cereais C_3 produzem em média de 1,5 a 2 g de massa seca (MS) kg^{-1} H_2O consumida (Floss, 2008).

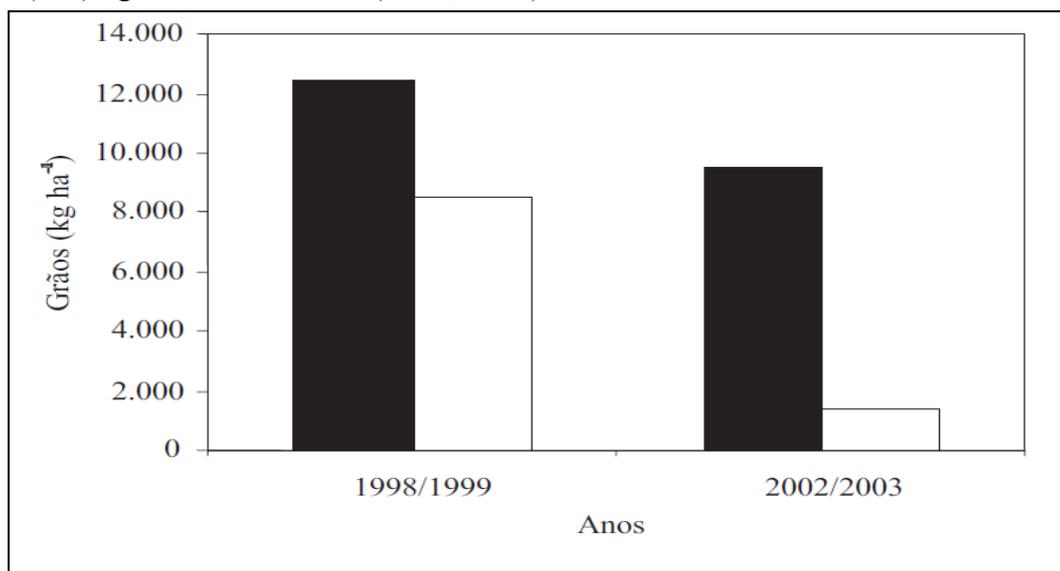


Figura 3. Produtividade de grãos de milho, híbridos Pioneer 3063 (1998/1999) e Pioneer 33R21 (2002/2003), irrigado (■) e não irrigado (□). Fonte: Adaptado de Bergamaschi *et al.*, 2004.

O mecanismo que concentra o CO_2 das plantas C_4 faz com que a taxa fotossintética se mantenha constante com menor condutância estomática, ou menor percentagem de CO_2 no interior da folha (Ehleringer & Monson, 1993). Já nas espécies C_3 a máxima fixação de CO_2 só é obtida a concentrações intercelulares mais elevadas (Harley & Tenhunen, 1991). A difusão de CO_2 da atmosfera até os locais onde ocorre a carboxilação está sujeito a uma série de fatores que oferecem resistência a entrada no interior da folha e alguns desses fatores são os mesmos que governam também a difusão do vapor de água. Sendo assim, para uma mesma condutância estomática há maior E_w nas plantas C_4 do que nas plantas C_3 . No entanto, a condutância das folhas das plantas C_4 tende a ser, em idênticas condições atmosféricas, cerca de 40% menor do que nas plantas C_3 (Long, 1985). Porém as plantas de metabolismo C_3 são mais prejudicadas, pois ocorre redução da condutância estomática. Por exemplo, o milho possui estratégia muito interessante para reduzir o estresse hídrico, que é o mecanismo de ajustamento osmótico, sendo este mecanismo presente em ambos os sistemas de semeadura, direta ou convencional, porém mais intenso no último sistema, demonstrando um potencial mínimo da água na folha, maior em sistema de semeadura direta, em razão do maior potencial matricial da água no solo nesse sistema (Bianchi *et al.*, 2005).

O milho tende a expressar sua elevada produtividade quando a máxima área foliar coincidir com a maior disponibilidade de radiação solar, desde que não haja déficit hídrico. Essa condição permite a máxima fotossíntese possível, porém aumenta a necessidade hídrica da cultura, já que o elevado fluxo energético incidente também eleva a evapotranspiração. No Estado do Rio Grande do Sul, Bergamaschi *et al.* (2001) observaram que a cultura do milho necessita em torno de 7 mm dia^{-1} de água na fase de florescimento, quando este ocorre próximo ao solstício de verão, que é o período de máxima radiação solar.

Quando o déficit hídrico ocorre durante o florescimento (período crítico da cultura), a produtividade de grãos é afetada, reduzindo, principalmente, o número de grãos por espiga (Bergonci *et al.*, 2001). Nessas condições, o uso da irrigação torna-se fundamental, pois é nessa fase que ocorrem os maiores efeitos do déficit hídrico e também a maior eficiência do uso da irrigação, tanto na produção de matéria seca quanto na produtividade de grãos. De acordo com Bergonci & Bergamaschi (2002) esta tendência foi verificada quando ocorreu déficit hídrico durante o período crítico da cultura do milho, provocando quedas bruscas na produtividade da cultura. As estatísticas

de produção revelam que, nos períodos que ocorrem estiagem durante os meses de verão, as produtividades das culturas são baixas, causando prejuízos às cadeias produtivas (Matzenauer et al., 2002). Por este motivo, é importante compreender e quantificar os processos que envolvem relações clima-planta, em particular as relações hídricas, a fim de implementar medidas capazes de reduzir os impactos da deficiência hídrica sobre a produção das culturas e assim, possibilitar o agricultor a adotar medidas preventivas de manejo para evitar prejuízos advindos da estiagem.

Ao avaliar diferentes híbridos de milho em função de déficit hídrico, Almeida et al. (2003) constataram que houve significativa queda na produção da massa seca da parte aérea, taxa de crescimento celular, índice de área foliar (IAF) e taxa de expansão celular das plantas, sendo que a resposta varia de acordo com o híbrido utilizado. Os mesmos autores avaliaram ainda a influência do déficit hídrico nos componentes da produtividade, estudando diferentes híbridos, e constataram que todos foram afetados com a falta de água, resultando na perda de produtividade de grãos superior a 20% ou 1.983 kg ha⁻¹. Entretanto, alguns híbridos de milho têm maior sensibilidade ao déficit hídrico, por exemplo, os materiais Pioneer 3230, 3063 e 32R21 apresentaram redução de produtividade na ordem de 44, 29 e 25%, respectivamente, quando comparado a ausência de deficiência hídrica (Bergamaschi et al., 2006).

Bergamaschi et al. (2004) observaram elevada limitação da produtividade de milho em condições não irrigadas, onde a produtividade se manteve abaixo de 2.000 kg ha⁻¹, já ao dispor de água obtiveram produtividade média de 10.000 kg ha⁻¹, ou seja, houve um aumento na produtividade em cinco vezes ao irrigar a cultura. A adoção de algumas práticas de manejo de solo e semeadura podem diminuir o efeito da deficiência hídrica sobre a produtividade de grãos de milho. Na semeadura direta, com espaçamentos mais distantes, ocorre menor limitação de água com maior produtividade de grãos de milho, quando comparado com espaçamento reduzido (Kuns et al., 2007).

Alguns fenômenos climáticos como o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) provocam alterações na quantidade de precipitação pluviométrica no Estado do Rio Grande do Sul. De maneira geral, eventos de El Niño estão associados ao aumento de precipitação pluviométrica no Estado, eventos de La Niña estão associados a diminuição. Eventos de “La Niña” podem causar drásticas reduções na produtividade de milho, com sérios prejuízos a todos os integrantes da cadeia produtiva (Bergamaschi et al., 2004). Mesmo em anos considerados normais em relação ao ENOS pode haver diminuição do rendimento de grãos do milho (Alberto et al., 2006). Bergamaschi et al. (2004) constataram que pode haver redução da produtividade mesmo em anos favoráveis, se o déficit hídrico ocorrer no período crítico, ou seja, da pré-floração ao início de enchimento de grãos. De modo contrário, em anos de estiagem, a cultura poderá ter desempenho adequado, em algumas épocas, contando que haja suprimento hídrico no período crítico. Desta forma, a irrigação apenas neste período poderá garantir produtividade satisfatória, mesmo que a cultura sofra restrições no restante do ciclo (Matzenauer, 1994; Bergonci et al., 2001). Portanto, a irrigação na cultura do milho é essencial, fornecendo água na quantidade adequada e atendendo à necessidade hídrica no momento certo, ou seja, no período crítico.

Estresse por encharcamento

O desenvolvimento e a produção da maioria das espécies vegetais cultivadas são afetados negativamente quando submetidas a solos mal drenados, devido à falta de oxigênio livre (Vartapetian & Jackson, 1997). A extensão de danos decorrentes do encharcamento do solo depende de vários fatores, incluindo a duração do período de saturação, o estágio de desenvolvimento da planta e as demais condições ambientais. Para a cultura do milho, as reduções na produtividade de grãos em áreas encharcadas são mais pronunciadas quando o estresse ocorre no início do estágio vegetativo (Kanwar et al., 1988; Mukhtar et al., 1990).

Silva et al. (2006) ao trabalharem com as linhagens de milho R1, R2, S5 e S6, realizando no total

12 cruzamentos mais as linhagens puras, observaram diferenças no desenvolvimento de alguns híbridos, com destaque no S5 x R2, que apresentaram produtividade de matéria seca superior às demais, quando submetidas a estresse por encharcamento do solo (Tabela 1). Resultados similares também foram encontrados por Sachs et al. (1996) em que constaram haver diferença quanto a este estresse em diferentes linhagens de milho. No entanto deve-se tomar cuidado com as variações do ambiente, principalmente em relação à temperaturas altas, pois este fator é muito prejudicial às plantas em condição de estresse por encharcamento (Lemke-Keyes & Sachs, 1989).

Também outro fator que interfere em maior ou menor tolerância das plantas de milho ao excesso de água, destaca-se a adubação e em especial o emprego de esterco animal (Silva et al., 2006). Nesse sentido há necessidades de mais pesquisa para desenvolvimento de cultivares mais adaptadas a solos hidromórficos. Solos estes que ocupam grandes áreas onde a cultura do milho pode vir a ser cultivada com êxito em sistema de rotação com o arroz irrigado no Sul do Brasil, em especial no Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 1. Médias de estatura de planta (EP), comprimento de raiz (CR) e conteúdo de clorofila (CL) e suas correlações com matéria seca da parte aérea (MSP) e da raiz (MSR) em 16 genótipos de milho conduzidos em casa de vegetação. Pelotas, RS, 2000 e 2001.

Genótipo	200		2001
	EP (cm)	CR (cm)	CL (SPAD)
R1 x R2	51,71 f ¹	27,21 fgh ¹	28,45 ab ¹
R1 x S5	64,57 abc	36,29 ab	28,61 ab
R1 x S6	55,79 ef	26,93 fgh	29,60 a
R2 x R1	67,50 a	31,57 cde	31,64 a
R2 x S5	66,00 ab	37,57 a	28,85 ab
R2 x S6	63,07 abcd	33,71 abcd	30,12 a
S5 x R1	64,00 abc	29,93 def	30,46 a
S5 x R2	65,67 ab	34,43 abc	30,08 a
S5 x S6	60,38 cde	26,74 fgh	29,67 a
S6 x R1	58,93 de	32,86 bcd	28,63 ab
S6 x R2	61,93 bc	31,73 cdef	27,61 ab
S6 x S5	60,50 cd	28,29 efg	29,46 a
R1	46,76 g	23,19 h	30,57 a
R2	58,25 de	27,80 efg	28,19 ab
S5	52,92 f	24,19 gh	22,88 c
S6	51,00 fg	25,31 gh	25,03 bc
R (MSP)	0,88 ** ²	0,78 **	0,45 **
R (MSR)	0,75 **	0,56 **	0,45 **

¹ Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade. ²Significativo a 1% de probabilidade por teste de r (STEEL & TORRIE, 1980). Fonte: Adaptado de Silva et al., (2006).

Temperatura

O milho é uma planta de clima tropical que exige calor e umidade para expressar altas produtividades (Duarte, 2006). As temperaturas do solo inferiores a 10 °C e superiores a 42 °C prejudicam sensivelmente a germinação, considerando que àquelas situadas entre 25 e 30 °C propiciam as melhores condições para os processos germinativos e de emergência das plântulas (Streck et al., 2009). Semeadura em épocas frias aumenta consideravelmente o período para emergência, reduzindo vigor das plântulas e ficando maior período suscetível ao ataque de pragas e doenças. Porém, cabe salientar que alguns híbridos possuem maior capacidade de emergência e germinação em solos frios, possibilitando a semeadura nestas condições (Duarte, 2006). Também ressalta-se que para determinadas regiões os híbridos tem respondido melhor a temperaturas médias do ar mais altas, como exemplo em Coxilha-RS, onde Didonet *et al.* ao trabalharem com os híbridos C-901, XL-560 e XL-678, XL-212 e XL-370 em três safras consecutivas observaram que as taxas de crescimento das plantas foram maiores conforme houve aumento na temperatura média do ar (Figura 4).

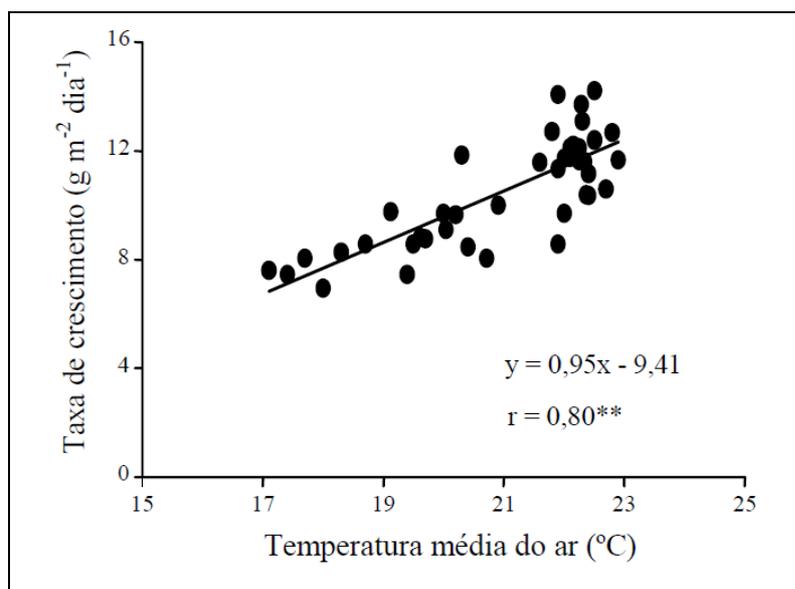


Figura 4. Efeito da temperatura média do ar sobre a taxa de crescimento da cultura, no período compreendido entre a emergência e o espigamento dos híbridos de milho (C-901, XL-560 e XL-678, em 1994/95; C-901, XL-212 e XL-370, nos anos de 1995/96 e 1996/97, em diferentes épocas de semeadura. Cada ponto representa a média de três repetições em cada época de semeadura. Fonte: Adaptado de Didonet *et al.* (2002).

A duração do ciclo do milho é determinada pelo somatório térmico, sendo que a cada grau de temperatura média diária superior a 21,1°C, nos primeiros 50-60 dias após a semeadura, pode antecipar o florescimento de dois a três dias (Fancelli, 1997). O autor afirma que produtividade do milho pode ser reduzida, bem como pode ser alterada a composição protéica dos grãos, quando há ocorrência de temperaturas acima de 35-37°C (>3 horas), na ocasião do período de formação do grão.

No florescimento e maturação, temperaturas médias diárias superiores a 26°C podem promover acentuada redução do ciclo da cultura (Fancelli & Dourado-Neto, 2000) da mesma forma, temperaturas inferiores a 15,5°C podem retardá-las. Também, temperaturas muito elevadas provocam redução na taxa fotossintética líquida, em função do aumento da respiração que afeta diretamente a produção. Por essa razão, temperaturas elevadas prevalentes no período noturno (>24°C) promovem um consumo energético demasiado (Floss, 2008). Em temperaturas elevadas há significativa redução do número de óvulos contidos na espiga (Bertrand, 1991).

A temperatura diária das plantas é fortemente determinada pela radiação, dissipação de calor por convecção e transpiração. Já no período noturno, a temperatura das plantas é governada somente

pela re-radiação e temperatura do ar (Fancelli & Dourado-Neto, 2000).

Resultados de pesquisas em áreas de produção demonstram que altas temperaturas noturnas reduzem a produtividade de grãos (Tabela 2) (Andrade, 1995). Elevadas temperaturas noturnas tem também associação com senescência precoce e maturidade, reduzido período de enchimento de grãos, e conseqüentemente a produtividade.

Tabela 2. Efeito da temperatura média noturna na produtividade de grãos de milho.

Tratamento	Temperatura média noturna		Rendimento de Grãos ¹	
	°C	kg ha ⁻¹	%	
Controle	18,3	10.482 a	100,00	
Frio	16,6	10.168 a	97,00	
Calor	29,4	6.277 b	60,00	

¹ Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Fonte: Adaptado de Andrade (1995).

Em temperaturas inferiores a 20°C, caso de plantios mais precoces, ocorre redução na eficiência da conversão da radiação solar em fitomassa (Andrade et al., 1993) apresentando menor acúmulo de massa até a antese. Dessa forma, a maior produtividade de milho, poderá ser obtida em situações de elevada radiação solar incidente e temperaturas médias amenas, principalmente noturnas, desde que não ocorram outras limitações ambientais ou de manejo da cultura.

A elevação da temperatura do ar aumenta a quantidade de vapor de água que a atmosfera pode reter, desse modo, com aumento da temperatura há redução no potencial hídrico da atmosfera, elevando o gradiente entre o potencial da folha e do ar. Esta situação aumenta a taxa de transpiração, e conseqüentemente promove um maior consumo de água, podendo esta ser o principal limitante a produção de milho em condições de elevada temperatura (Floss, 2008).

O provável aumento da temperatura associado as incertezas existentes com relação a distribuição pluviométrica poderão limitar a produção agrícola futura. Esse aumento da temperatura pode causar aumento da evapotranspiração e limitar a produção de culturas de sequeiro onde não é utilizada a irrigação. Além disso, com a elevação das temperaturas, em especial em período noturno, haverá maiores taxas de respiração, culminando em menor taxa fotossintética líquida e produtividade.

Alguns trabalhos demonstram que a temperatura não influencia no desenvolvimento de plantas com a elevação do CO₂ (Buse et al., 1998; Williams et al., 2000) enquanto outros relatam haver forte interação entre o efeito de CO₂ e temperatura (Johns & Hughes, 2002; Veteli et al., 2002). Neste sentido, a temperatura poderá influenciar negativamente na produtividade das culturas, já que há uma forte relação entre a concentração de CO₂ na atmosfera e sua disponibilidade para as plantas com a capacidade destas absorverem este elemento para a realização da fotossíntese, revertendo em produção de grãos de milho.

Radiação Solar

Dentre os elementos climáticos, a radiação solar desempenha um papel fundamental na fotossíntese e, conseqüentemente no desenvolvimento, crescimento e produtividade das plantas. Estudo efetuado por Didonet et al. (2002) demonstra que houve aumento linear da taxa de crescimento da cultura com o aumento da radiação solar interceptada em híbridos de milho (Figura 5). A maior ou menor plasticidade adaptativa das espécies às diferentes condições de radiação solar depende do ajuste de seu aparelho fotossintético, de modo a garantir maior eficiência de uso da radiação na produção de fotoassimilados, refletindo em maior produtividade de grãos (Vilela & Ravetta, 2000).

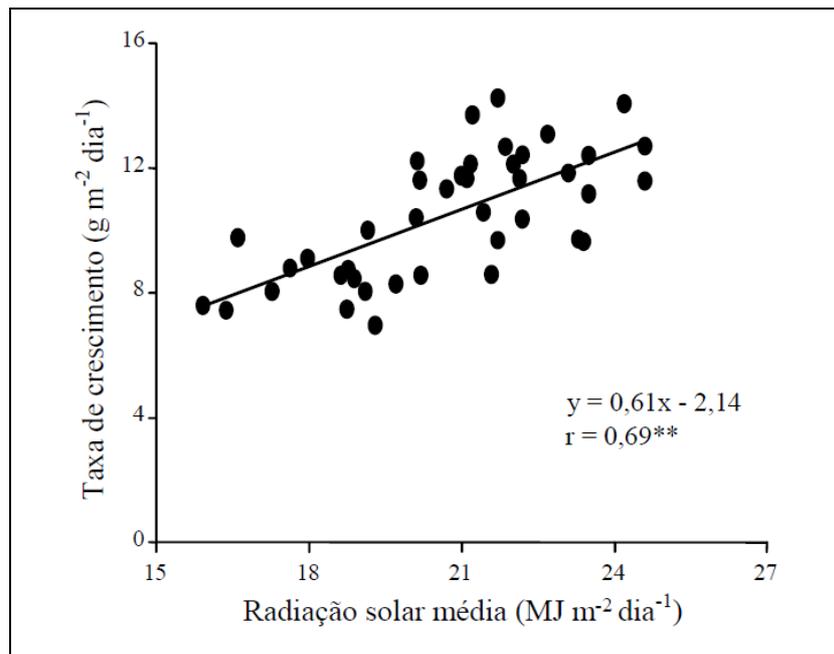


Figura 5. Efeito da radiação solar global total média incidente sobre a taxa de crescimento da cultura, no período compreendido entre a emergência e o espigamento dos híbridos de milho (C-901, XL-560 e XL-678, em 1994/95; C-901, XL-212 e XL-370, nos anos de 1995/96 e 1996/97, em diferentes épocas de semeadura. Cada ponto representa a média de três repetições em cada época de semeadura. Fonte: Adaptado de Didonet *et al.* (2002).

A interceptação de luz pelo dossel é dependente, além da densidade e do arranjo das plantas, de um conjunto de características morfológicas dos vegetais como: estatura e número de plantas, área foliar, distribuição e ângulo foliar (Blackshaw, 1994; 1999; Marchão et al., 2006). Híbridos modernos de milho possuem ângulo de inserção foliar menor, ou seja, folhas mais eretas que possibilitam melhor distribuição da radiação no dossel, ocasionando maior eficiência no uso deste recurso, além de proporcionar incremento na utilização de fertilizantes, aplicação de novos herbicidas, adoção do sistema de plantio direto, além de outros fatores que favorecem o cultivo adensado. As plantas que interceptam elevada quantidade de luz na fase inicial de desenvolvimento apresentam maior sucesso competitivo (Fleck et al., 2003). Maiores índices de área foliar em milho, obtidos com alteração do espaçamento entre linhas, podem não alterar a quantidade de radiação solar interceptada devido ao maior sombreamento potencial do extrato inferior do dossel (Strieder et al., 2008).

A competição por luminosidade pode ser inter ou intraespecífica, a primeira diz respeito a plantas de espécies diferentes e a segunda resulta da competição entre plantas da mesma espécie. Em caso de elevada competição interespecífica na cultura do milho por radiação solar há maior alocação de assimilados no colmo, o que ocasiona maior estatura das plantas e maior interceptação da radiação. Porém, os assimilados alocados nos tecidos do colmo não mais serão realocados para o enchimento de grãos, vindo a reduzir o índice de colheita (IC) da cultura. A maior taxa de crescimento da parte aérea, no início do ciclo da cultura, proporciona melhor habilidade competitiva por radiação solar, exercendo supressão às plantas daninhas (Ni et al., 2000; Fleck et al., 2003). Este efeito é mais significativo com a redução de espaçamento entre as linhas das cultura, possibilitando rápido fechamento do solo pelo dossel, maior interceptação da radiação e eficiência no uso da radiação. Marchão et al. (2006) observaram que existe correlação positiva entre a densidade de plantas e a interceptação da radiação solar fotossinteticamente ativa, indicando que o adensamento da cultura (0,45 m entre linhas) permite um maior rendimento de grãos em decorrência do aumento linear da interceptação pelo dossel.

Em geral, a interceptação da radiação solar está relacionada com o Índice de área foliar (IAF), por funções exponenciais. O IAF que determina a taxa máxima de crescimento é conhecido como IAF crítico, o qual varia em função do ambiente que a planta estiver submetida. O IAF crítico para a cultura do milho oscila entre valores de 3 a 5, de acordo com a região, híbridos e sistema de produção considerados (Fancelli & Dourado-Neto, 2004). Para manifestação da capacidade produtiva, é necessário que a planta apresente 85 a 90% da IAF crítico. A escolha do arranjo de plantas adequado é uma das práticas de manejo mais importantes para otimizar o rendimento de grãos de milho, pois afeta diretamente a interceptação de radiação solar, que é um dos principais fatores determinantes da produtividade. Além da redução o espaçamento entre linhas, outra forma de se melhorar a interceptação da radiação é através do aumento da densidade de plantas, proporcionada por cultivos adensados, com densidades acima de 60.000 plantas por hectare (Almeida et al., 2000; Argenta et al., 2001; Sangoi et al., 2002; Marchão et al., 2005; Argenta et al., 2001; Piana et al., 2008). A população de plantas de milho muito aquém do recomendado requer maior período de tempo para atingir IAF crítico (Andrade, 1995). Por outro lado, populações adensadas poderão acarretar o auto-sombreamento prematuro de folhas, reduzindo, da mesma forma, o potencial produtivo.

A redução de 50% da radiação incidente no período compreendido entre 15 dias antes e 15 após a antese provocou a redução de 40 a 50% da produtividade de grãos de milho (Andrade, 1992). A redução da radiação é um fenômeno normal em períodos chuvosos ou de nebulosidade. No mesmo sentido, destruição de 25% da área foliar do milho em sua porção terminal, próximo ao florescimento, foi responsável pela redução de 32% da produção (Fancelli, 1988). A área foliar fotossinteticamente ativa pode ser reduzida em função do ataque de pragas ou doenças, bem como nas práticas de despendoamento mecânico do milho em campos de produção de sementes híbridas, assim tem-se redução da quantidade produzida e também da qualidade fisiológica das mesmas. Porém, além dos fatores supracitados deve-se destacar ainda a ocorrência de grande limitação da interceptação da radiação quando tem-se simultaneamente deficiência hídrica, devido ao enrolamento das folhas, principalmente nas espécies pertencentes a família das poaceas (Kuns et al., 2007).

Nutrientes

Na atualidade, considera-se que os nutrientes representam os fatores abióticos que mais limitam a produtividade do milho. A deficiência nutricional ocorre em função da pedologia dos solos e, principalmente, da elevada exportação dos nutrientes em função das colheitas, pois conforme o exposto na Tabela 3, quanto maior é a produtividade de milho, de modo geral, maior é a demanda por macro ou micro nutrientes pela cultura. Outro agravante é a baixa disponibilidade de nutrientes nos solos devido à complexação, a qual é potencializada com elevada acidez dos solos brasileiros, associada ao déficit hídrico prolongado (Fernandes & Muraoka, 2002).

Além do mais, a disponibilidade dos nutrientes para as culturas pode ser mais crítica em função da competição com as plantas daninhas (Procópio et al., 2004). Silva et al. (2006) relatam que o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), são os nutrientes mais limitantes quando as culturas estão competindo com as plantas daninhas (Tabela 4), o que ocasiona elevadas perdas de produtividade, caso nenhuma medida de controle das espécies invasoras for tomada a tempo.

De acordo com Anguinoni et al. (1989) a capacidade de absorção de nutrientes do solo pelas plantas depende da magnitude e da morfologia do seu sistema radicular e da eficiência na absorção desses elementos. Segundo os autores, o principal fator nutricional limitantes da produção nos solos, é a deficiência de P, aliada à alta capacidade de complexação deste nutriente, em solos geralmente ácidos e de alta saturação de alumínio (Al^{3+}), tornando o nutriente indisponível para as plantas.

Tabela 3. Necessidade de macro ou micronutrientes pela cultura de milho de acordo com o aumento de produtividade.

Elemento	Toneladas de milho ha ⁻¹		
	7-8	9-10	11-12
N (%)	1,70-1,90	2,10-2,30	2,50-2,70
P	0,20	0,20	0,25-0,30
K	2,60	2,40	2,00-2,20
Ca	0,40	0,45	0,50
Mg	0,16	0,19	0,22
S	0,16	0,19	0,22
B ppm	10	12	13
Cu	12	14	13
Fe	110	120	140
Mn	20	25	30
Zn	25	30	30
N/K	0,65-0,73	0,87-0,96	1,13-1,35
N/P	8,50-9,50	10,50-11,50	8,30-10,80
N/S	10,60-11,80	11,00-12,10	11,30-12,20
K/Ca	6,50	5,30	4,00-4,40
K/Mg	16,20	12,60	9,00-10,00
N/B	1700-1900	1750-1916	1920-2076
P/Zn	80	66	83-100
Mg/Mn	80	76	73
Fe/Mn	5,50	4,80	4,60

Fonte: Adaptado de Malavolta, 2006.

Tabela 4. Comparação da absorção de nutrientes pelo milho, livre de plantas daninhas e na presença de diferentes espécies.

Espécie	Absorção relativa				
	N	P	K	Ca	Mg
Milho	100	100	100	100	100
Milho + plantas daninhas	58	63	47	67	77
<i>Amaranthus</i>	102	80	124	275	234
<i>Chenopodium</i>	120	74	121	281	216
<i>Digitaria</i>	100	64	157	531	226
<i>Echinochloa</i>	105	60	138	430	557

Fonte: Adaptado de Silva et al., 2006.

Diversos autores têm proposto alternativas para solução dos problemas de fertilidade que seriam, além de melhores técnicas de adubação e correção dos solos (Goedert et al., 1985) selecionar híbridos mais tolerantes ao Al e mais eficientes na absorção e utilização de P e demais nutrientes (Macedo, 1996; Bahia Filho et al., 1997). A capacidade das plantas se desenvolverem em solos com

baixo teor de P disponível tem sido atribuída a diversos fatores, incluindo diferenças na morfologia e a densidade dos pêlos radiculares (Hocking et al., 1997). Parentoni et al. (1999) observaram que genótipos ineficientes na absorção de P quando cultivados em solução nutritiva com omissão deste elemento não apresentaram diferenças quanto à morfologia do sistema radicular, enquanto que os considerados eficientes aumentaram o peso e o comprimento das raízes após o estresse de deficiência de P. Os aumentos no comprimento foram de 55% para os híbridos simples, 61% para o duplo e 112% para o triplo.

Entre os nutrientes, o N desempenha importantes funções no metabolismo das plantas, participando como constituinte de moléculas de proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos, citocromos, clorofila entre outros, sendo um dos nutrientes mais relevantes para o aumento de produtividade (Ferreira et al., 2001). O N é um dos nutrientes mais limitantes quando a cultura está em competição com as plantas daninhas, sendo que altas densidades populacionais podem influenciar substancialmente na produtividade da cultura, ou mesmo ocasionar perda total da lavoura caso a competição se estabeleça nas fases mais críticas da cultura (Balbinot Jr. et al., 2001).

Ferreira et al. (2001) testando os nutrientes N, Zinco (Zn), Molibdênio (Mo) constataram que as variáveis; produção de grãos, peso das espigas com e sem palha, peso de mil grãos e o número de espigas por planta, foram influenciadas positivamente somente pelo incremento de doses de N e nenhuma das variáveis respondeu a aplicação dos demais elementos (Figuras 6A e B).

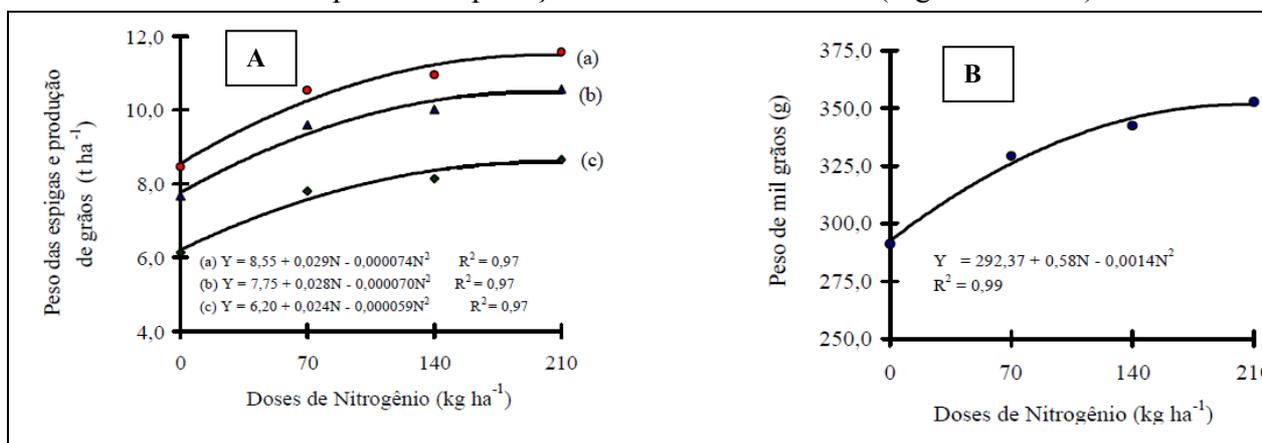


Figura 6. Efeito das doses de nitrogênio sobre; A - peso das espigas com palha (a), sem palha (b), produção de grãos e B - peso de mil grãos. Fonte: Ferreira *et al.*, (2001).

A ausência de resposta à aplicação de alguns nutrientes, em especial Zn e o Mo, na cultura do milho deve-se principalmente a alta disponibilidade do elemento no solo, estando acima do nível crítico para as plantas de milho (Couto et al., 1992; Ferreira et al., 2001).

A adubação nitrogenada influencia não só a produtividade, mas também a qualidade do produto colhido em consequência do teor de proteína alocada nos grãos de milho (Sabata & Mason, 1992; Landry & Delhaye, 1993). O maior crescimento de plantas de milho, promovido pela aplicação de doses elevadas de N, resulta em diluição de Zn na planta, provocando sua deficiência e necessidade de seu uso na adubação (Floneragan & Webb, 1993).

O número de ovários e de óvulos contidos na espiga são afetados pela deficiência de N (Uhart & Andrade, 1995). Todavia, a baixa disponibilidade de nitrogênio (< 25 kg ha⁻¹) e a presença de temperaturas baixas (< 12 °C), no início do desenvolvimento da planta, contribuem de forma decisiva para a redução do tamanho da raiz e do potencial produtivo da cultura (Fancelli, 1997).

Outro limitante não é somente a ausência de nutrientes à cultura do milho, mas também o excesso pode causar decréscimo da produção de grãos do cereal, em função da toxicidade ocasionada pelos nutrientes, dentre eles destaca-se o Al presente em altas concentrações nos solos brasileiros (Magnavaca & Bahia-Filho, 1995). A obtenção de híbridos tolerantes à toxicidade deste

nutriente vem despertando o interesse de muitas áreas da pesquisa agrícola brasileira, particularmente quando se pretende explorar eficientemente os solos com acidez subsuperficial e elevado nível de Al de difícil correção somente com manejo químico (Granados et al., 1993; Pandey et al., 1994). Níveis elevados de Al impedem o crescimento radicular das plantas e, aliados à períodos de deficiência hídrica, podem reduzir drasticamente a produtividade do milho, inviabilizando, às vezes, seu cultivo em área de solos ácidos.

Segundo Parentoni et al. (2000) o desenvolvimento de genótipos de milho adaptados a solos ácidos se baseia no binômio tolerância ao alumínio e produção em solos ácidos e férteis. Esses autores ressaltam que a seleção no campo é feita para um complexo determinante de solo ácido, havendo outros fatores envolvidos, além da concentração de alumínio.

Resultados obtidos por Machado et al. (1998) quanto à tolerância ao Al em milho crioulo revelaram ampla variabilidade entre germoplasmas. Em trabalho de Lima et al. (1995) e Paterniani et al. (2000) obtiveram linhagens de milho com tolerância ao Al tóxico, com acréscimos na produtividade de grãos. Também Paterniani & Furlani (2002) concluíram que algumas linhagens constituem-se em fontes de tolerância ao Al tóxico, baseadas no comprimento líquido da radícula, com elevada produtividade em solos corrigidos com os demais nutrientes.

CO₂

Nas últimas décadas, a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera está aumentando devido às atividades antrópicas. Este nível elevado afeta diretamente os processos fotossintéticos envolvidos em respostas morfofisiológicas nas plantas, estas alterações variam com as espécies, dependendo da diferenças das rotas fotossintéticas, taxa de crescimento e outras características.

As concentrações de CO₂ atualmente são de 0,038% da constituição do ar, concentração que têm aumentado a uma taxa de 0,4–0,5% anualmente, com prospecção de continua, e acompanhando esse aumento, é previsto a elevação da temperatura (Tabela 5), com variação de 1 a 6 °C até o final deste século (Streck, 2005).

Tabela 5. Impacto de produtividade (%) em diferentes culturas com aumento da concentração de CO₂ e o acréscimo na temperatura.

Cultura	CO ₂ (ppm)	Acréscimo de temperatura (°C)			
		+1	+2	+4	+5
% de produtividade					
Trigo	660	25	16	-	-32
Arroz	660	4	-5	-	-25
Soja	555	-	-3	-11	-
Milho	550	-	-9	-20	-

Fonte: Streck, 2005.

A elevação da concentração do CO₂ pode diretamente influenciar no maior influxo de CO₂ para o interior da planta, tornando-a mais eficiente fotossinteticamente, principalmente em plantas de metabolismo C₃, com redução da oxigenação no ciclo de Calvin reduzindo a fotorrespiração e consequentemente maior produção de fotossíntese líquida (Floss, 2008). Podendo a planta absorver quantidades satisfatórias de CO₂ com menor perda de água, devido ao fechamento parcial dos estômatos. Estudos mostram que várias espécies respondem à elevação da concentração de CO₂ com o aumento na eficiência do uso da água (Field et al., 1995; Fredeen et al., 1997).

O efeito direto dos níveis elevados de CO₂, com o passar do tempo é proporcionar modificações entre as espécies, sendo que estas alterações poderão ocasionar consequência importante na agricultura (Fuhrer, 2003). A elevação da concentração de CO₂ pode vir a potencializar a produção das plantas em função da maior atividade fotossintética destas, sendo a primeira resposta do incremento de CO₂ atmosférico e também o decréscimo na taxa de fotorrespiração e transpiração. No milho, há estímulo para fechamento estomático com a concentração de 0,1% de CO₂ (Klar, 1988). Desse modo, reduzindo a perda de água, sem limitar a fotossíntese, devido a menor condutância estomática. Também, trabalhos mostram que o incremento de CO₂ pode resultar em aumento na área foliar de plantas (Field et al., 1995; Samarakoon & Gifford, 1996). Mudanças secundárias na morfologia, alocação e composição química podem afetar o crescimento das culturas (Poorter et al., 1997). Strack (2005) relata que com o dobro da concentração atual de CO₂ um cereal de metabolismo C₃ tende a produzir 30% a mais comparativamente a um cereal de metabolismo fotossintético das C₄.

A cultura do milho apresenta características fisiológicas favoráveis à eficiência de conversão do carbono mineral em compostos orgânicos (Williams et al., 2000) não sofrendo grandes variações na produtividade com elevação da concentração de CO₂, desde que não haja outro fator limitante no ambiente, a exemplo da água.

Por consequência da elevação da concentração de CO₂, há aumento das temperaturas, devido a potencialização do “efeito estufa”. A projeção para a concentração de CO₂ no ano de 2100 é de 540 à 970 ppm, comparado com cerca de 280 ppm na era pré-industrial e cerca de 368 ppm no ano de 2000, acompanhado com o aumento global da temperatura de 1,4 à 5,8 °C (IPCC, 2001). Esse aumento da temperatura do ar pode vir a influenciar as taxas fotossintéticas, pois a maioria das plantas, principalmente as de metabolismo C₃ reduzem atividades metabólicas em altas temperaturas e aumentam a respiração, tanto diurna quanto noturna, culminando em redução acentuada das taxas fotossintéticas.

A maior concentração de CO₂ pode interferir no uso e incorporação de nutriente nos grãos dos cereais. Seneweera & Conroy (1997) mostraram que sobre elevado nível de CO₂ a concentração de Zn em grãos de arroz-preto diminuiu em média cerca de 15%, e que para Fe o decréscimo foi superior à 60%. Em trigo, elevado nível de CO₂ reduziu as concentrações de Ca, S, Mg, Fe e Zn no grão (Manderscheid et al., 1995), enquanto Fangmeier et al. (1999) relataram decréscimos nas concentrações de Ca, S e Fe. Devido ao valor nutricional do milho em todo o mundo, é importante ressaltar a preocupação sobre a possibilidade de efeitos negativos nas características nutricionais nos grãos deste, em função das mudanças na concentração de CO₂ atmosférico que estão acontecendo na atualidade.

Resultados experimentais de competição com espécies C₃ e C₄, avaliando somente o aumento de CO₂, sugerem que, regiões em que ambas as espécies ocorrem, há maior incremento no potencial competitivo das plantas C₃ (Alberto et al., 1996). Mas, estes resultados são questionáveis, pois com a elevação da concentração de CO₂ na atmosfera interfere em outros efeitos climáticos, como elevação da temperatura, evapotranspiração, imprevisibilidade das precipitações, entre outros efeitos que podem influenciar de forma negativa as espécies de forma diferenciada, dependendo do metabolismo fotossintético.

CONCLUSÕES

A melhoria da produtividade de uma cultura pode estar associada com maior tolerância a diferentes estresses ambientais e assim resultar em aumento da estabilidade de produtividade. Para o cultivo do milho deve-se levar em consideração muitos fatores de ordem biótica e abiótica, mas as previsões climáticas, como a decisão para época de semeadura, uso de insumos, objetivando redução das limitações ambientais, são de fundamental importância.

Em suma, algumas estratégias básicas relacionadas à mitigação dos efeitos climáticos no cultivo

do milho, dentre os aspectos discutidos anteriormente, merecem especial destaque: manejo adequado de solos; semeadura em época adequada; uso de híbridos adaptados para as condições de produção; conhecimento pleno das etapas críticas da cultura; irrigação; disponibilização gradual de nutrientes; otimização da distribuição espacial de plantas. Os efeitos de agentes climáticos podem ser potencializados com a ocorrência simultânea de agentes bióticos, como plantas daninhas, doenças e insetos-praga, desse modo deve-se adotar o manejo adequado destes agentes.

Com as mudanças climáticas, além do aumento da concentração de CO₂, há aumento de temperatura, desse modo reduzindo o ciclo e aumentando das taxas respiratórias do milho, podendo tornar-se menos produtivo nestas condições.

REFERÊNCIAS

- AGENTA, G. *et al.* Potencial de rendimento de grãos de milho em dois ambientes e cinco sistemas de produção. **Scientia Agraria**, v.4, p.27-34, 2003.
- ALBERTO, A.M.P. *et al.* The influence of increasing carbon dioxide and temperature on competitive interactions between a C3 crop, rice (*Oryza sativa*) and a C4 weed (*Echinochloa glabrescens*). **Australian Journal of Plant Physiology**, v.23, p.795-802, 1996.
- ALBERTO, C.M. *et al.* Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.7, p. 1067-1075, 2006.
- ALMEIDA, M.L. *et al.* Crescimento inicial de milho e sua relação com o rendimento de grãos. **Ciência Rural**, v.33, p. 189-194, 2003.
- ANDRADE, F.H. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. **Field Crops Research**, v.41, p.1-12, 1995.
- ANDRADE, F.H. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Instituto Nacional de tecnología agropecuária. Balcarce, Argentina. 34p. 1992 (Boletín Técnico, 106).
- ANDRADE, F.H.; UHART, S.A.; FRUGONE, M. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: hade versus plant density effects. **Crop Science**, v.33, p. 482-485, 1993.
- ARGENTA, G. *et al.* Resposta de híbridos simples de milho à redução do espaçamento entre linhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 71-78, 2001.
- BAHIA FILHO, A.F.C. *et al.* Identification, utilization, and economic impact of maize germplasm tolerant to low levels of phosphorus and toxic levels of exchangeable aluminum in Brazilian soils. In: MONIZ, A.C. *et al.* **Plant-soil interactions at low pH: Sustainable agriculture and forestry production**. Brasília: SBCS, 1997, p.59-70.
- BALBINOT JR. *et al.* Velocidade de Emergência e Crescimento Inicial de Cultivares de Arroz Irrigado Influenciado a Competitividade com as Pantas Daninhas. **Planta Daninha**, v.19, p.305-316, 2001.
- BERGAMASCHI, H. *et al.* Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.243-249, 2006.
- BERGAMASCHI, H. *et al.* Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.831-839, 2004.
- BERGAMASCHI, H. *et al.* Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, v.1, p.23-27, 2001.
- BERGAMASCHI, H.; WHEELER, T.R.; CHALLINOR, A.J.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.603-613, 2007.
- BERGONCI, J.I. *et al.* Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.36, p.949-956, 2001.

BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H. Ecofisiologia do milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Embrapa Milho e Sorgo; Epagri, 2002. CD-ROM.

BERTRAND, M. **Mècanismes de l'élaboration du nombre de graines du maïs. Valeur prédictive d'indicateurs écophysiológicos.** Thèse Dr. Institut National Agronomique, Paris-Grignon, 1991, 185p.

BIANCHI, C.A.M.; BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A. Ajuste osmótico em milho cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.645-651, 2005.

BIANCHI, C.A.M. *et al.* Condutância da folha em milho cultivado em plantio direito e convencional em diferentes disponibilidades hídricas. **Ciência Rural**, v.37, p.315-322, 2007.

BLACKSHAW, R.E. Differential competitive ability of winter wheat cultivars against downy brome. **Agronomy Journal**, v.86, p.649-654, 1994.

BRACHTVOGEL, E.L. *et al.* Densidades populacionais de milho em arranjos espaciais convencional e equidistante entre plantas. **Ciência Rural**, v.39, n.8, p.2334-2339, 2009.

BUSE, A. *et al.* Effects of elevated temperature and carbon dioxide on the nutritional quality of leaves of oak (*Quercus robur* L.) as food for the Winter Moth (*Operophtera brumata* L.). **Functional Ecology**, v.12, p.742-749, 1998.

CARGNELUTTI FILHO, A. *et al.* Associação entre métodos de adaptabilidade e estabilidade em milho. **Ciência Rural**, v.39, n.2, p. 340-347, 2009.

CASTRO, C.R.; GARCIA, R. Competição entre plantas com ênfase no recurso luz. **Ciência Rural**, v.26, p.167-174, 1996.

COUTO, C. *et al.* Níveis críticos de zinco no solo e na planta para o crescimento de milho em amostras de solos com diferentes valores do fator capacidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.79-87, 1992.

DIDONET, A.D. *et al.* Efeito da radiação solar e temperatura na definição do número de grãos em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.7, p.933-938, 2002.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water.** Food and agriculture organization of the united nations - FAO, 1979. 193p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements.** Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO, 1975, 179p.

EMBRAPA: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivo do Milho.**

Versão Eletrônica - 2ª Edição, 2006. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/>>. Acessado: 15 de maio 2008.

DURÃES, F.O.M. *et al.* **Fenotipagem associada a tolerância a seca em milho para uso em melhoramento, estudos genômicos e seleção assistida por marcadores.** (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 35). 20p, 2004.

DURÃES, F.O.M.; MAGALHÃES, P.C.; OLIVEIRA, A.C. Índice de colheita genético e as possibilidades da genética fisiológica para melhoramento do rendimento de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.1, p.33-40, 2002.

EHLERINGER, J.; MONSON, R.K. Evolutionary and ecological aspects of photosynthetic pathway variation. **Annual Review Ecology and Systematics**, v.24, p.411-439, 1993.

EMBRAPA: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Série Histórica de: área, produtividade e produção de milho. Embrapa: 2006. Disponível em:

<<http://www.embrapa.gov.br>> Acesso em: 05 maio. 2007.

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento agrícola do milho. Versão eletrônica 2ª edição, Embrapa Milho e Sorgo**, 2006. Disponível em:

<<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho/zoneamento>>. Acessado em: 07 de maio.2007.

FANCELLI, A.L. **Influência do desfolhamento no desempenho de plantas e de sementes de milho (*Zea mays* L.)**. 1988. 172p. (Tese de Doutorado). ESALQ/USP, Piracicaba.

FANCELLI, A.L.; D. DOURADO-NETO. **Produção de Milho**. Guaíba: 2º Ed. Agropecuária. 2004. 360p.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: ESALQ/USP, Departamento de Agricultura, 1997. 174p.

FANGMEIER, A. *et al.* Effects on nutrients and on grain quality in spring wheat crops grown under elevated CO₂ concentrations and stress conditions in the European, multiple-site experiment 'ESPACE-wheat'. **Europe Journal of Agronomy**, v.10, p.215–229, 1999.

FERNANDES, C.; MURAOKA, T. Absorção de fósforo por híbridos de milho cultivados em solo de cerrado. **Scientia Agricola**, v.59, p.781-787, 2002.

FERREIRA, A.C.B. *et al.* Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agricola**, v.58, p.131-138, 2001.

FIELD, C.B.; JACKSON, R.B.; MOONEY, H.A. Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plant to the global scale. **Plant, Cell & Environment**, v.18, p.1214–1226, 1995.

FLECK, N.G. *et al.* Características de plantas de cultivares de arroz irrigado relacionadas à habilidade competitiva com plantas concorrentes. **Planta Daninha**, v.21, p.97-104, 2003.

FLONERAGAN, J.; WEBB, M.J. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants. In: ROBSON, A.D. (Ed.) **Zinc in soils and plants**, p.119-134, 1993.

FLOSS, E.L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: UPF, ed. 4, 2008. 749p.

FREDEEN, A.L. *et al.* Elevated atmospheric CO₂ increases water availability in a water-limited grassland ecosystem. **Journal of the American Water Resources Association**, v.33, p.1033-1039, 1997.

FUHRER J. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.97, p.1-20, 2003.

GOEDERT, W.J.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W.J. **Solos dos cerrados**. Tecnologias e estratégias de manejo. São Paulo: Nobel; EMBRAPA, p.129-166, 1985.

GRANADOS, G.; PANDEY, S.; CEBALLOS, H. Response to selection for tolerance to acid soils in a tropical maize population. **Crop Science**, v.33, p.936-940, 1993.

HARLEY, P.C.; TENHUNEN, J.D. Modeling the photosynthetic response of C3 leaves to environmental factors. In: Modeling Crop Photosynthesis - from Biochemistry to Canopy. **Crop Science Societal American**, p.17-39, 1991.

HOCKING, P.J. *et al.* Comparison of the ability of different crop species to access poorly available soil phosphorus. In: ANDO, T. *et al.* **Plant nutrition** – for sustainable food production and environment. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p.305-308, 1997.

INTERGOVERNMENTAL GROUP ON CLIMATE CHANGE (IPCC) **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.

- JOHNS, C.V.; HUGHES, A. Interactive effects of elevated CO₂ and temperature on the leaf-miner *Dialectica scariella* Zeller (Lepidoptera: Gracillariidae) in Paterson's Curse, *Echium plantagineum* (Boraginaceae). **Global Change Biology**, v.8, p.142–152, 2002.
- KANWAR, R.S. *et al.* Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. **Transactions of the ASAE**, v.31, p.133-141, 1988.
- KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo. Ed. Nobel, 1988. 408p.
- KUNZ, J.H. *et al.* Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1511-1520, 2007.
- LANDRY, J.; DELHAYE, S. The Tryptophan contents of wheat, maize and barley grains as a function of nitrogen content. **Journal of Cereal Science**, v.18, p.259-266, 1993.
- LEMKE-KEYES, C.A.; SACHS, M.M. Genetic variation for seedling tolerance to anaerobic stress in maize germplasm. **Maydica**, Bergamo, v.34, p.329-337, 1989.
- LIMA, M.G.; FANCELLI, A.L. Calibração e validação do modelo Ceres-Maize em condições tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.13, p.118-126, 1995.
- LONG, S.P. Leaf gas exchange. In: *Photosynthetic Mechanisms and the Environment*. Elsevier, Amsterdam, p.453-500, 1985.
- MACEDO, J. Os solos da região dos cerrados. In: ALVAREZ, V.H.V. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS; UFV, 1996.
- MACHADO, A.T.; MACHADO, C.T. de T.; FURLANI, P.R. Avaliação e caracterização de variedades locais de milho para condições adversas de ambiente. In: SOARES, A.C. et al. **Milho crioulo: conservação e uso da biodiversidade**. Rio de Janeiro: AS-PTA – Assessoria e serviços a projetos em agricultura alternativa, 1998, p.151-185.
- MAGNAVACA, R.; BAHIA-FILHO, A.F.C. Seleção de milho para tolerância a alumínio. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTRESSE AMBIENTAL: O MILHO EM PERSPECTIVA, 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Sete Lagoas: EMBRAPACNPMS/ CIMMYT/UNDP, 1995. p.369-394.
- MALAVOLTA, E. Diagnose Foliar. In: MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. p.568-612.
- MANDERSCHIED, R. *et al.* Effects of season long CO₂ enrichment on cereals. II. Nutrient concentrations and grain quality. **Agriculture Ecosystem Environmental**, v.54, p.175–185, 1995.
- MARCHÃO, R. L. *et al.* Densidade de plantas e características agronômicas de híbridos de milho em espaçamento reduzido entre linhas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, p. 93-101, 2005.
- MARCHÃO, R. L. *et al.* Interceptação da radiação fotossinteticamente ativa e rendimento de grãos do milho adensado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, p. 170-181, 2006.
- MATZENAUER, R. *et al.* **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja, no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, 2002. 105p. (Boletim Fepagro, 10).
- MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. 1994. 172p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MUKHTAR, S. *et al.* Corn growth as effected by excessive soil water. **Transactions of the ASAE**, v.33, p.135-155, 1990.
- NI, H.; MOODY, K.; ROBLES, R.P. *Oryza sativa* plant traits conferring ability against weeds. **Weed Science**, v.48, p.200-204, 2000.

- PÁEZ, A.; GONZÁLES, M.E.; YRAUSQUÍN, O.X. Water stress and clipping management effects on guineagrass. I. Growth and biomass allocation. **Agronomy Journal**, v.87, p. 698-706, 1995.
- PANDEY, S. *et al.* Genetics of tolerance to soil acidity in tropical maize. **Crop Science**, v.34, p.1511-1514, 1994.
- PARENTONI, S. *et al.* Seleção de milho para tolerância a solos ácidos: técnicas e critérios para diferenciação de cultivares. In: DUARTE, A.P.; PATERNIANI, M.E.A.G.Z. (Coords.). Fatores bióticos e abióticos em cultivares de milho e estratificação ambiental: avaliação IAC/CATI/Empresas, **Boletim Científico**, 5, Instituto Agrônomo de Campinas, p.11-17, 2000.
- PARENTONI, S.N. *et al.* Adaptação de milho a solos ácidos: Tolerância à toxidez de alumínio e eficiência no uso de nutrientes no programa de pesquisa da EMBRAPA - Milho e Sorgo. In: REUNION LATINOAMERICANA DEL MAIZ, 18., Sete Lagoas: **Memórias**. Sete Lagoas: EMBRAPA –Milho e Sorgo; México: CIMMYT, p.179-199, 1999.
- PATERNIANI, M.E.A.G.Z. *et al.* Diallel crosses among maize lines with emphasis on resistance to foliar diseases. **Genetics and Molecular Biology**, v.23, p.381-385, 2000.
- PATERNIANI, M.E.L.A.G.Z.; FURLANI, P.R. Tolerância à toxicidade de alumínio de linhagens e híbridos de milho em solução nutritiva. **Bragantia**, v.61, p.11-16, 2002.
- PIANA, A.T. *et al.* Densidade de plantas de milho híbrido em semeadura precoce no Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.38, n.9, p 2608-2612, 2008.
- POORTER, H. *et al.* The effect of elevated CO₂ on the chemical composition and construction costs of leaves of 27 C3 species. **Plant Cell & Environment**, v.20, p.472-482, 1997.
- PROCÓPIO, S.O. *et al.* Absorção e utilização do nitrogênio pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Planta Daninha**, v.22, p. 365-374, 2004.
- RADOSEVICH, S.; HOLT, J.; GHERSA, C. **Weed ecology**: implications for management. 2. ed. New York: Wiley, 1997. 588p.
- SABATA, R.J.; MASON, S.C. Corn hybrid interactions with soil nitrogen level and water regime. **Journal of Production Agriculture**, v.5, p.137-142, 1992.
- SACHS, M.M. *et al.* Anaerobic gene expression and flooding tolerance in maize. **Journal of Experimental Botany**, v.47, p.1-15, 1996.
- SANGOI, L. *et al.* Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. **Field Crops Research**, v.79, p.39-51, 2002.
- SAMARAKOON, A.B.; GIFFORD, R.M. Water use and growth of cotton in response to elevated CO₂ in wet and drying soil. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.23, p.63-74, 1996.
- SILVA, A. A. *et al.* Biologia de Plantas Daninhas. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Ed.) **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa-MG: Editora UFV, 2007. p. 17-61.
- SENEWEERA, S.; CONROY, J. Growth, grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) in response to elevated CO₂ and phosphorus nutrition. **Soil Science Plant Nutrition**. v.43, p.131-1136, 1997.
- SILVA, D. F. Biocombustíveis e produção animal impulsionarão a cultura. **Agrianual**, p. 373-374, 2004.
- SILVA, S.D.A.E. *et al.* Capacidade combinatória de genótipos de milho para tolerância ao encharcamento do solo. **Ciência Rural**, v.36, p.391-396, 2006.
- STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, p.734-744, 2005.

- STRECK, N. A. *et al.* Temperatura base para aparecimento de folhas e filocrono da variedade de milho BRS Missões. **Ciência Rural**, v.39, n.1, p.224-227, 2009.
- STRIEDER, M. L. *et al.* Características de dose e rendimento de milho em diferentes espaçamentos e sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 43, p. 309-317, 2008.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.
- UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. Nitrogen and carbonum accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios. **Crop Science**, v.35, p.183-190, 1995.
- VARTAPETIAN, B.B.; JACKSON, M.B. Plant adaptations to anaerobic stress. **Annals of Botany**, v.79, p.3-20, 1997.
- VETELI, T.O. *et al.* Effects of elevated CO₂ and temperature on plant growth and herbivore defensive chemistry. **Global Change Biology**, v.8, p.1240-1252, 2002.
- VILELA, A.E.; RAVETTA, D.A. The effect of radiation on seedling growth and physiology in four species of *Proposis L.* (Mimosaceae). **Journal of Arid Environmental**, v.44, p.415-423, 2000.
- WILLIAMS, R.S.; NORBY, R.J.; LINCOLN, D.E. Effects of elevated CO₂ and temperature-grown red and sugar maple on gypsy moth performance. **Global Change Biology**, v.6, p.685–695, 2000.