

RELAÇÕES HÍDRICAS, FENOLOGIA E PRODUTIVIDADE DO MILHO SOB DEFICIÊNCIA HÍDRICA

Magno Luiz Abreu¹; Marcelo Júnior Gimenes¹; Renata Passos Pincelli¹; Ana Carolina da Costa Lara¹, Elizeu Luiz Brachtvogel¹; Marcelo de Almeida Silva².

¹Programa de Pós-Graduação em Agricultura, Departamento de Agricultura e Melhoramento Vegetal, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, SP, Brasil, Telefone: 014-3811-7132 Caixa Postal 237, CEP 18603-970 - Botucatu-SP.

²Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), Pólo Centro-Oeste, Caixa Postal 66, 17201-970, Jaú, SP, Brasil.

RESUMO: O milho (*Zea mays* L.) é um dos mais importantes cereais cultivados e consumidos ao redor do mundo, e a deficiência hídrica é uma das maiores limitações à sua produtividade. Entender como a cultura do milho responde quanto à fisiologia, morfologia e ao acúmulo osmoprotetores sob déficit hídrico nas diferentes fases do crescimento pode auxiliar no manejo da cultura durante a ocorrência de períodos de carência hídrica visando minimizar perdas na produtividade. Portanto, o fator água é determinante em todo ciclo da cultura, entretanto sendo fundamental em algumas fases críticas. Assim, esta revisão tem por intuito analisar os principais fatores que afetam características do milho em situações de carência de água, bem como seus ajustes fisiológicos, tais como fotossíntese, transpiração, fechamento estomático, equilíbrio osmótico, potencial hídrico das folhas, crescimento, desenvolvimento, florescimento e fertilização, durante os diferentes estádios de seu desenvolvimento, bem como os reflexos desse estresse na produtividade.

Palavras-chave: *Zea mays*, estresse abiótico, ecofisiologia, produção, condições edafoclimáticas

WATER RELATIONS, PHENOLOGY AND PRODUCTIVITY OF MAIZE UNDER WATER DEFICIT

SUMMARY: Maize (*Zea mays* L.) is one of the most important cultivated and consumed cereals around the world, and the water deficiency is one of the main stress-causing factors in its development leading to a reduction in the productivity. Understanding as the crop responds as of physiology, morphology and the osmoprotector accumulation under water deficit in different growth phases may be helpful on the crop management during the occurrence of drought stress periods aiming to minimize losses of the productivity. Therefore, the water factor is fundamental in all crop cycle, however being crucial in some critical phases. Thus, this revision has the intention to show and to explain some traits of the maize in situations of water deficiency, as well as its physiologic adjustments, such as photosynthesis, transpiration, stomatic conductance, osmotic balance, water potential, growth, development, flowering and fertilization during the different stages of its phenology, as well as the consequences of this stress on the productivity.

Key words: *Zea mays*, abiotic stress, ecophysiology, yield, edafoclimatic conditions

INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é um dos mais importantes cereais cultivados e consumidos no mundo, em função de seu potencial produtivo, composição química e valor nutritivo, além da suas múltiplas utilidades e aplicações, seja na alimentação humana ou na alimentação animal, assumindo papel sócio-econômico importante e imprescindível (FANCELLI & DOURADO NETO, 2004).

Esse cereal, originário do continente norte-americano (México), atualmente é cultivado em várias regiões do mundo e, apesar de todos os avanços tecnológicos utilizados (sementes, híbridos, variedades, fertilizantes, herbicidas, irrigação, inseticidas, etc.), suas baixas produtividades são credenciadas, principalmente, à deficiência hídrica e ao uso de cultivares e híbridos com baixo potencial produtivo (FANCELLI & DOURADO NETO, 2000). A produtividade do milho em muitos países de clima tropical fica em torno de 1 a 2 t ha⁻¹, contrastando amplamente com as produtividades de 4 a 12 t ha⁻¹ obtidas por melhoristas nestes mesmos países. Isto indica claramente que as condições de cultivo diferem daquelas onde os materiais foram desenvolvidos, diferenças atribuídas principalmente à disponibilidade hídrica (MAGALHÃES, 1995).

Para FANCELLI & DOURADO NETO (2000), o milho, em comparação com outras espécies cultivadas, tem sido utilizado nas mais diferenciadas áreas do conhecimento agrônomo, e também tem tomado espaço nas áreas de manejo ambiental, proporcionando com isso, melhor compreensão de suas relações com o homem.

Estas interações mostram-se fundamentais para o exercício da previsão de comportamento da planta, quando submetida a estímulos e ações negativas advindas da atuação de agentes bióticos e abióticos no sistema produtivo.

Apesar do enorme esforço dos melhoristas e os recursos financeiros gastos pelos centros de pesquisas no desenvolvimento de novas cultivares de milho,

o conhecimento do metabolismo vegetal é fundamental para o manejo adequado da cultura e desenvolvimento de novas cultivares adequadas às condições específicas. Caso contrário, não saberemos o que fazer com o grande número de cultivares gerados anualmente, ou para onde direcionar os programas de melhoramento, pois nem mesmo teremos compreendido claramente o comportamento do metabolismo primário.

A diversidade edafoclimática, aliada aos diferentes sistemas de produção adotados, torna necessário conhecer as cultivares adaptadas às condições de cada região, já que este é um fator de suma importância para a obtenção de altos rendimentos. Os fatores que influenciam o desenvolvimento da cultura podem ser abióticos (fatores edafoclimáticos), biótico (pragas e doenças) e manejo cultural e varietal.

Neste sentido, esta revisão tem por objetivo analisar o atual estado da arte no estudo das características da planta de milho em situações de deficiência de água, bem como seus mecanismos ajustes fisiológicos, morfológicos e osmóticos sob o estresse hídrico, durante os diferentes estádios de seu desenvolvimento, bem como o reflexo desse estresse na produtividade.

Ambiente de produção e fenologia

A necessidade de se obter altas produtividades em menor área possível, com baixo custo de produção, implica em conhecer o ambiente no qual a cultura está inserida, com o objetivo de aperfeiçoar e minizar as relações entre os diferentes fatores de produção visando obter da planta o máximo do seu potencial produtivo. Entre tais fatores estão: a temperatura, umidade relativa do ar, umidade do solo e precipitação pluvial (TERAMOTO, 2003).

O milho é uma planta de origem tropical, necessitando de calor e umidade para se desenvolver. Em regiões de clima subtropical, os fatores ambientais como, as variações na disponibilidade de água, térmica (calor) e de radiação solar (luz), exercem grande influência

sobre o desenvolvimento fenológico do milho.

A temperatura do ar é o elemento meteorológico que melhor explica a duração dos períodos de desenvolvimento desta cultura, havendo relação linear entre a duração destes períodos e o desenvolvimento da planta (LOZADA & ANGELOCCI, 1999). Segundo GADIOLI (1999), no desenvolvimento do milho a determinação da duração do ciclo em dias tem demonstrado inconsistência, devido ao fato de que a duração do ciclo da planta está associada às variações das condições ambientais, e não somente ao número de dias transcorridos.

A temperatura do ar é um dos fatores de maior importância no crescimento e desenvolvimento do milho, tendo influência em praticamente todo o ciclo da cultura desde a germinação até a maturação dos grãos. De acordo com SHAW (1977), as maiores produções de milho ocorrem onde as temperaturas nos meses mais quentes oscilam de 21°C a 27°C, não existindo um limite máximo de temperatura para a produção de milho, no entanto, a produtividade tende a diminuir com o aumento da temperatura. REZENDE et al. (2004) relatam que os ciclos vegetativos e reprodutivos variam conforme a temperatura. De acordo com os autores, quando as temperaturas médias durante o período de crescimento são superiores a 20°C, o ciclo das variedades precoces variam de 80 a 110 dias, e o das variedades médias, de 110 a 140 dias para atingir a fase de maturidade fisiológica. Quando as temperaturas médias são inferiores a 20°C, o ciclo da cultura aumenta de 10 a 20 dias para cada 0,5°C de diminuição da temperatura, dependendo da variedade, ressaltando que a 15°C o ciclo da cultura do milho em grão varia de 200 a 300 dias (REZENDE et al., 2004).

A umidade relativa tem importância fundamental no crescimento e desenvolvimento das plantas, na conservação de sementes e controle de perda de água das plantas para a atmosfera. Em regiões quentes e úmidas a demanda evaporativa é reduzida devido ao ambiente que se aproxima da saturação, por isso a quantidade de água que

pode ser absorvida pelo ar diminui, reduzindo assim a evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

A água é fator fundamental na produção de qualquer cultura, seu déficit ou excesso, afeta o desenvolvimento e a produtividade final dos cultivos agrícolas. A deficiência de água no solo interfere nas relações hídricas, na fisiologia e na morfologia das plantas a ponto de causar estresse hídrico que pode limitar severamente a produção das culturas anuais.

Sendo assim, o estresse hídrico se torna preocupante, pois grande parte das áreas agricultáveis está sujeita a veranicos ou secas prolongadas em todo o território nacional.

O milho, durante o ciclo de desenvolvimento, consome grandes quantidades de água, sendo que 99% do total consumido é perdido pelo mecanismo da transpiração (REICHARDT & TIMM, 2004). O conhecimento das relações água-solo-planta-atmosfera é fundamental para melhorar o manejo da cultura. Assim, torna-se possível manejar a cultura de modo que os períodos críticos da lavoura, em relação à água, coincidam com a estação de maior disponibilidade hídrica. Quando as plantas de milho possuem entre três a cinco folhas completamente expandidas são definidas fisiologicamente todas as folhas e espigas que a planta eventualmente irá produzir durante o ciclo (RITCHIE et al., 2003). Nesta fase é possível visualizar microscopicamente a iniciação do pendão na extremidade de formação do caule, logo abaixo da superfície do solo, sendo este período sensível à deficiência hídrica (MAGALHÃES & DURÃES, 2006). Outra fase fenológica considerada crítica é da pré-floração ao início do enchimento de grãos, onde a ocorrência de carência hídrica pode resultar em prejuízo na produção do milho (MORIZET & TOGOLA, 1984), pois neste estágio a falta de água pode influenciar os processos fisiológicos ligados à formação do zigoto e ao início do enchimento de grãos (BERGAMASCHI et al., 2004).

Fenologia do milho sob deficiência hídrica

O milho tem ciclo vegetativo variado, evidenciando desde genótipos extremamente precoces onde a polinização pode ocorrer 30 dias após a emergência, até mesmo aqueles cujo ciclo vital pode alcançar 300 dias. No Brasil, a cultura de milho apresenta ciclo entre 110 a 180 dias, em função da caracterização dos genótipos (superprecoce, precoce e tardio), período esse compreendido entre a semeadura e a colheita (FANCELLI & DOURADO NETO, 2000). As plantas de milho seguem geralmente um mesmo padrão de desenvolvimento, porém, o intervalo de tempo específico entre os estádios e o número total de folhas desenvolvidas podem variar entre cultivares, ano agrícola, data de plantio e local.

O sistema de identificação empregado (RITCHIE et al., 2003) divide o desenvolvimento da planta em vegetativo (V) e reprodutivo (R). Subdivisões dos estádios vegetativos são designados numericamente como V1, V2, V3 até Vn; em que (n) representa a última folha emitida antes do pendoamento.

O primeiro e o último estádios V são representados, respectivamente, por VE (emergência) e VT (pendoamento). Durante a fase vegetativa, cada estádio é definido de acordo com a formação visível do colar na inserção da bainha da folha com o colmo.

Assim, a primeira folha de cima para baixo é considerada completamente desenvolvida quando o colar é visível e, portanto, é contada como tal (RITCHIE et al., 2003). O milho praticamente não apresenta saturação por radiação solar, pelo fato de ser uma planta C4.

O mecanismo de concentração deste composto provoca uma saturação no sítio da enzima rubisco, não permitindo a limitação da carboxilação (TAIZ & ZEIGER, 2004). No entanto, essa cultura apresenta um período crítico, que vai da pré-floração ao início do enchimento de grãos (MORIZET & TOGOLA, 1984). Nessa fase fenológica, o milho é sensível à deficiência hídrica, podendo-se observar maior sensibilidade nos processos fisiológicos ligados à formação do zigoto e início do enchimento de grãos, e na elevada transpiração que ocorre nesse período, em

razão do maior índice de área foliar. Os eventos de formação do zigoto e início do crescimento dos grãos são muito suscetíveis a estresses, sobretudo ao hídrico (ZINSELMEIER et al., 1995). BERGAMASCHI et al. (2004) relata que a planta do milho, por ser uma espécie de metabolismo C4, 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.

BERGAMASCHI et al. (2001) trabalhando com a cultura do milho no Rio Grande do Sul, observou que a planta necessita em torno de 7 mm por dia de água durante o florescimento, quando este ocorre próximo ao solstício de verão. Com 67 mil plantas por hectare, um híbrido precoce de milho necessita de uma média de 650 mm de água em todo o ciclo. No entanto, numa população de 50 mil plantas por hectare, a necessidade média é de 577 mm para todo o ciclo do milho, na mesma região (MATZENAUER et al., 1983). Isso reforça a necessidade de um planejamento adequado de práticas de manejo para adequar as populações de plantas às reais condições edafoclimáticas, principalmente em lavouras que não dispõem de irrigação.

A produção de milho é uma resultante do produto entre número de espigas por área, número de grãos em cada espiga e peso médio dos grãos. Na maioria dos casos, entretanto, a produção está mais associada com o número de grãos por área que com o peso médio dos mesmos, ou com o número de espigas por planta. Por sua vez, para um dado genótipo, o número de grãos que chega à maturidade parece depender mais da sobrevivência das espiguetas fecundadas do que do número potencial de espiguetas (OTEGUI & ANDRADE, 2000). Embora se saiba que plantas submetidas a diferentes tipos de estresse diminuem o número de grãos por planta e, conseqüentemente, a produtividade,

os eventos químicos e bioquímicos relacionados ao metabolismo nitrogenado e glicídico, que levam ao estabelecimento/abortamento dos grãos, bem como ao desenvolvimento dos mesmos ainda não está totalmente esclarecido (FALEIROS et al., 1996; ZINSELMEIER et al., 1995). No Brasil, o rendimento da cultura do milho apresenta alta variabilidade, dado a ocorrência de déficits hídricos causados pelas variações da precipitação (CAZETTA et al., 2005). Dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20%, quatro a oito dias diminuem o rendimento em mais de 50%. O efeito da falta de água, associado à produção de grãos, é particularmente importante em três estádios de desenvolvimento da planta: a) iniciação floral e desenvolvimento da inflorescência, quando o número potencial de grãos é determinado; b) período de fertilização, quando o potencial de produção é fixado; nesta fase, a presença da água também é importante para evitar a desidratação do grão de pólen e garantir o desenvolvimento e a penetração do tubo polínico; c) enchimento de grãos, quando ocorre o aumento na deposição de matéria seca, o qual está intimamente relacionado à fotossíntese, desde que o estresse resulte na menor produção de carboidratos, o que implicaria em menor volume de matéria seca nos grãos (MAGALHÃES & DURÃES, 2006).

GUEI & WASSON (1992) constataram que as datas de florescimento masculino e feminino, bem como o intervalo antese-emissão dos estigmas são influenciados por déficit hídrico, estresse térmico e de nitrogênio.

Deste modo, o intervalo da emergência do pendão até o aparecimento dos estigmas aumenta, de três a quatro dias, com deficiência hídrica, fazendo com que, por falta de polinização, se desenvolvam espigas estéreis ou com poucos grãos (HERRERO & JOHNSON, 1981). Aparentemente as falhas reprodutivas em milho ocorrem porque o suprimento de assimilados em plantas deficientes em água não é suficiente para manter o crescimento de todos os novos zigotos formados. Outra causa pode ser a

inibição do alongamento do estilete e o retardamento na emergência dos estigmas, que fazem com que estes fiquem menos expostos à polinização. ZINSELMEIER et al. (1995) observaram redução de 45 a 65 % do número de grãos por espiga em plantas de milho submetidas ao potencial de água na folha de - 0,40 MPa, no período das 8 às 10 h, durante a emergência dos estigmas e polinização.

O período que vai da fertilização até a maturidade fisiológica dos grãos é caracterizado por três diferentes etapas (JOHNSON & TANNER, 1972). A primeira, denominada de etapa de retardamento, é o período durante o qual predomina a divisão celular, e o aumento de peso é insignificante. A segunda etapa, chamada de etapa linear de enchimento do grão, é um período de rápido aumento de peso, quando mais de 90% da matéria seca final é acumulada, e há intensa atividade de conversão de açúcares em amido no endosperma. Durante a terceira etapa, a taxa de acúmulo de matéria seca declina, terminando com a maturidade fisiológica.

QUATTAR et al. (1987) observaram que o crescimento do grão é mais sensível à falta de água durante a etapa de divisão celular do que na etapa de rápida deposição de amido.

Os eventos de formação do zigoto e início do crescimento dos grãos, aparentemente, são muito vulneráveis à deficiência hídrica. Contudo, se o enchimento do grão for iniciado, seu desenvolvimento continua embora ocorra déficit severo no tecido materno (QUATTAR et al., 1987). Isto sugere que as reservas são remobilizadas para auxiliar na continuação do crescimento do grão. A fim de verificar especificamente a influência da deficiência hídrica sobre o enchimento de grãos, WESTGATE (1994) impôs estresse hídrico após o número de grãos terem sido estabelecidos, ou seja, cinco dias após a antese. A falta de água diminuiu o período de enchimento de grãos, mas não alterou a taxa de acúmulo de matéria seca, nem no endosperma nem no embrião. O enchimento de grãos continuou tanto no milho irrigado quanto no não irrigado, até que o

conteúdo de água no endosperma e do embrião decresceu até 280 e 340 g kg⁻¹ de peso fresco, respectivamente. As plantas estressadas completaram o período de enchimento dez dias antes das irrigadas, porque a perda de água iniciou-se logo após a antese, e o conteúdo máximo de água do embrião era menor, comparado com a testemunha. Além disso, o autor observou que a taxa de acúmulo de matéria seca não diminuiu com baixos potenciais de água no solo, devido à ocorrência de remobilização de reservas das folhas e do colmo, e desta maneira, as plantas estressadas remobilizaram 110% a mais reservas do que as hidratadas. Considerando que o rendimento de grãos é o resultado da integração de vários processos, é necessário estabelecer de que maneira estes componentes são afetados pela deficiência hídrica, uma vez que o rendimento das culturas depende da intensidade, duração e época de sua ocorrência, e da interação deste com outros fatores que determinam o rendimento final (CUNHA & BERGAMASCHI, 1992).

Relações hídricas e ajustamento osmótico do milho sob deficiência hídrica

O processo dominante em relações de água da planta é a absorção de grande quantidade de água do solo, sua translocação pela planta e a perda para a atmosfera na forma de vapor de água. De toda a água absorvida pelas plantas, menos que 5 por cento é retido de fato para o crescimento e muito menos é usado nos processos bioquímicos.

A água passa pela planta e é perdida na forma de vapor de água. Este fenômeno é conhecido como transpiração (TAIZ & ZEIGER, 2004). A importância quantitativa da transpiração foi indicada por uma variedade de estudos durante vários anos. A planta de milho pode transpirar mais de 200 litros de água durante seu ciclo. Isto equivale aproximadamente a 100 vezes o seu próprio peso. Segundo PEREIRA et al. (2003), a cultura do milho no Estado do Rio Grande do Sul, por seu ciclo de desenvolvimento coincidir

com os períodos em que ocorre limitação hídrica, sofre perturbações fisiológicas e morfológicas que afetam o desenvolvimento das plantas e, portanto, a elaboração da biomassa vegetal. A deficiência hídrica afeta a bioquímica, a fisiologia, a morfologia e os processos de desenvolvimento das plantas, reduzindo a fotossíntese de três maneiras: pela redução na área foliar disponível para interceptar a radiação solar, pela redução da difusão do CO² para dentro da folha e pela redução da habilidade dos cloroplastos para fixar o CO² que neles penetra (JONES, 1985).

O decréscimo na disponibilidade de água no solo ocasiona queda no potencial da água nas folhas das plantas, levando à perda de turgidez e à redução da condutância estomática (BERGAMASCHI et al., 2004).

Muito da redução na taxa de assimilação de CO² durante o estresse hídrico deve-se à redução na disponibilidade de CO² no interior da folha, causada pelo fechamento dos estômatos em resposta à redução da disponibilidade de água no solo. Este aumento da resistência à difusão gasosa, com diminuição na taxa de assimilação de CO², determina menor perda de água por transpiração, além de poder afetar a fotossíntese. O desenvolvimento e a duração da área foliar fotossinteticamente ativa da planta determinam a fração de radiação solar a ser interceptada pelo dossel da cultura, influenciando o desenvolvimento e a produção final. CARLESSO (1993) demonstrou que a manutenção da área foliar fotossinteticamente ativa, em condições de deficiência hídrica terminal, afeta a quantidade de água transpirada pelas plantas. Assim, em situação de déficit hídrico a manutenção da área foliar pela planta ocasiona estabilidade na produção, devido à maior fração de interceptação da radiação solar pela planta, quando a água for fator limitante.

O estresse hídrico causa, a curto prazo, reduções na condutância estomática e no crescimento de folhas e, a longo prazo, reduções no crescimento do caule das plantas. Reduções na taxa de fotossíntese líquida das plantas sujeitas ao estresse hídrico resultam

de um abaixamento da capacidade fotossintética do fotossistema II (BUNCE, 1988), ou do fechamento dos estômatos (CRUZ de CARVALHO et al., 1998).

CEULEMANS et al. (1988) observaram uma menor taxa líquida de troca de CO_2 ao longo do dia nas plantas de milho estressadas do que nas não estressadas, sendo o potencial da água na folha menor nas plantas estressadas. Concluíram que a taxa líquida de troca de CO_2 parece responder melhor à falta de água no solo do que ao potencial da água na folha, sendo o mesmo um melhor indicador de déficit hídrico da planta quando comparado ao potencial da água de base da folha. Períodos de carência hídrica que levaram ao fechamento estomático promoveram limitação na fotossíntese e, com o aumento da deficiência hídrica, o potencial da água na folha, o potencial osmótico e a condutância estomática diminuíram (PREMACHANDRA et al., 1992).

BERGONCI et al. (2000) observaram correlação entre a condutância foliar máxima e o potencial da água na folha em milho, sendo que à medida que diminui o potencial da água na folha, diminui a condutância foliar. BONO (1997) observou, em condições de campo e casa de vegetação, que à medida que o potencial da água na folha do milho se aproxima de zero aumenta a condutância.

Quando os estômatos fecham, em resposta ao decréscimo no potencial da água na folha, a fotossíntese diminui, principalmente, como resultado da baixa disponibilidade de CO_2 para o aparelho fotossintético (RADIN & ACKERSON, 1982).

HARRISON et al. (1989) observaram um coeficiente de correlação entre a fotossíntese líquida e a condutância estomática de 0,76, sendo linear a correlação entre as variáveis consideradas. Observaram também que, quando o potencial da água foliar foi reduzido para cerca de -3,5 MPa, a fotossíntese relacionou-se menos com a condutância estomática, sugerindo que a difusão do CO_2 através dos estômatos não foi o fator limitante para as baixas taxas fotossintéticas. MACHADO & LAGÔA (1994)

constataram que a relação entre a condutância estomática e a fotossíntese seguem a forma de uma hipérbole retangular, onde, especificamente para a cultura do milho, a fotossíntese apresentou saturação em relação à condutância estomática com valores em torno de 700 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. PEREIRA et al. (2003) concluíram que a condutância foliar é o indicador fisiológico que melhor se correlaciona com a fotossíntese em diferentes condições de disponibilidade hídrica.

O controle estomático da condutância foliar ao vapor de água é um importante mecanismo através do qual o vegetal limita a sua perda. O fechamento estomático pode ocorrer dentro de uma larga faixa de potencial da água na folha, dependendo da espécie.

Para o milho, os estômatos se fecham com potenciais da água na folha entre -1,7 e -2,0 MPa. BERGONCI et al. (2000) verificaram diminuição na condutância estomática do milho quando o potencial da água na folha chegou a -1,5 MPa. BIANCHI et al. (2007), concluem que a condutância foliar é maior no período inicial de crescimento em milho cultivado sob plantio convencional e a partir do pendoamento sob plantio direto.

Outros indicadores da condição hídrica das plantas, como o potencial mínimo da água na folha e o ajustamento osmótico, também evidenciam alterações sob carência hídrica (PREMACHANDRA et al., 1992). BERGONCI et al. (2000) relata que o potencial da água na folha ao entardecer, logo após o fechamento estomático, está relacionado à intensidade da deficiência hídrica (expressa pelo potencial foliar mínimo), e pode ser utilizado como indicador de estresse hídrico em milho. O potencial mínimo da água na folha tem relação linear com o potencial matricial da água no solo, a 45 cm de profundidade. Em condições de campo, a cultura do milho apresenta comportamento aniso-hídrico, cujo potencial da água na folha ocorre entre as 12h e 15h.

Na presença de deficiência hídrica, as plantas podem utilizar mecanismos de tolerância, como o ajuste osmótico, para que a célula absorva água e mantenha o potencial de pressão em níveis adequados. Durante a seca,

plantas superiores ativamente acumulam açúcares, ácidos orgânicos e íons no citosol para diminuir o potencial osmótico e, conseqüentemente, manter o potencial hídrico e o turgor de suas células próximo do nível ótimo (BRAY, 1997). A planta de milho, juntamente com outras culturas, tem a habilidade de manter a turgidez com pequeno declínio no potencial da água causado por uma baixa taxa de transpiração. PREMACHANDRA et al. (1992) constataram, em cultivares de milho, que ocorre ajuste osmótico sob condições de baixa umidade do solo, sendo o potássio o soluto que mais contribuiu para a redução do potencial osmótico. Isso torna possível manter a turgidez da folha em potenciais da água na folha menores, contribuindo para o ajustamento estomático e a manutenção da atividade fotossintética.

Acúmulos de prolina foram observados por ASPINALL & PALEG (1981) em tecidos foliares de diversas espécies quando submetidos às condições de estresse hídrico, calor e salinidade. Como variações genotípicas na capacidade de acumular prolina foram também constatadas, os observadores estabeleceram correlações entre estas alterações e os níveis de tolerância ao estresse ambiental.

A diminuição do potencial osmótico, em resposta à falta de água, pode resultar de uma concentração passiva de solutos, conseqüência da desidratação da célula, ou da acumulação ativa de solutos, mas só esta última pode ser considerada como ajuste osmótico. PREMACHANDRA et al. (1992), ao estudarem cinco cultivares de milho submetidas ao déficit hídrico, observaram que o potencial osmótico diminuiu, em todas as cultivares, em resposta ao decréscimo do teor de água no solo. De acordo com os mesmos autores, alta acomodação osmótica foi observada, com valores entre 0,08 e 0,43 Mpa.

Apesar de ser considerado um importante mecanismo de tolerância ao estresse hídrico, o ajuste osmótico pode não aumentar a produtividade das plantas, mas possibilita a continuação do desenvolvimento em condições de estresse (SERRAJ &

SINCLAIR, 2002). BIANCHI et al. (2005) estudando o ajuste osmótico de milho cultivado em plantio direto e convencional, concluem que a cultura apresenta ajuste osmótico mais intenso em solo manejado sob plantio convencional e o potencial mínimo de água na folha é maior em plantio direto, sendo que o potencial mínimo de água na folha pode ser considerado um indicador do estado hídrico em milho.

Produtividade do milho sob deficiência hídrica.

A produção potencial de uma cultura é determinada pelo número de grãos que podem ser formados. A falta de água afeta este número por motivo da infertilidade e do aborto floral e zigótico. O acúmulo de matéria seca vegetal é resultado do mecanismo fotossintético, o qual incorpora matéria orgânica na planta. Assim sendo, todo e qualquer fator que interfira na fotossíntese irá afetar o acúmulo de matéria seca. Fatores como nutrição mineral, radiação, área foliar e disponibilidade hídrica interferem significativamente na fotossíntese. Dentre estes, a disponibilidade de água desempenha papel preponderante, pois além de propiciar a entrada de CO², ela promove o resfriamento do vegetal, interferindo, desta forma, na taxa de fotossíntese e de respiração (WESTGATE, 1994).

O rendimento de grãos é determinado basicamente pelo número de grãos por unidade de área e, em menor escala, pela massa individual dos grãos. Enquanto a massa de grãos é influenciada pela taxa de enchimento de grãos e pelo tempo de acúmulo de massa seca (WANG et al., 1999), o número de grãos é associado à taxa de crescimento de planta no período de pendoamento (ANDRADE et al., 1999). Esse período, considerado crítico para a determinação do número de grãos, é também o mais suscetível a condições de estresse (KINIRY & BONHOMME, 1991). A taxa de crescimento de planta e a partição de massa seca entre órgãos vegetativos e reprodutivos, no período imediatamente antes e após o pendoamento,

são fatores que definem o número de drenos reprodutivos que são estabelecidos pela planta (ANDRADE et al., 1999). A eficiência de uso da radiação interceptada, as condições de temperatura e o estado fisiológico da cultura nesse período determinarão as taxas de crescimento da mesma, o número potencial de grãos e, conseqüentemente, o potencial produtivo da planta (OTEGUI & ANDRADE, 2000). Alguns autores têm demonstrado que a relação entre número de grãos por planta e taxa de crescimento de planta apresenta comportamento linear, enquanto outras não (ANDRADE et al., 1999).

Quando a carência hídrica ocorre durante o período crítico da cultura, a produtividade de grãos é afetada, reduzindo, principalmente, o número de grãos por espiga (BERGONCI et al., 2000), o qual é variável dentro e entre cultivares. Nessas condições, o uso da irrigação torna-se fundamental, pois é no período crítico que ocorrem os maiores efeitos da falta de água e também a maior eficiência do uso da irrigação, tanto na produção de matéria seca quanto na produtividade de grãos. No Estado do Rio Grande do Sul, essa tendência foi verificada nos anos de 1993/1994 e 1996/1997, quando ocorreu deficiência hídrica durante o período crítico da cultura do milho (BERGONCI & BERGAMASCHI, 2002). As estatísticas de produção revelam que, nos anos em que ocorrem períodos secos durante os meses de verão, a produtividade das culturas de verão é reduzida, 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 das estiagens sobre a produção dessas espécies.

O rendimento das espécies sob estresse está bem aquém dos seus potenciais de produtividade, dentre as quais se encontra o milho, caracteristicamente pouco tolerante à deficiência hídrica (SILVA et al., 1984) e cujo cultivo em regiões semi-áridas, como o Nordeste Brasileiro, é de suma importância

não só para suprir diretamente as necessidades alimentares da população, mas, também, da agroindústria regional. O esforço para evitar a desidratação é uma característica de muitas plantas, e é atingido percorrendo vários caminhos, em grande parte com a planta sofrendo adaptações morfológicas e fisiológicas na natureza; já a tolerância à desidratação é uma adaptação mais primitiva, típica de poucos organismos terrestres, dependentes da intrínseca propriedade do protoplasma. Essas respostas são dependentes, dentre outras, da duração, da intensidade e da velocidade de aplicação da deficiência hídrica (CARLESSO et al., 1996). Segundo MAGALHÃES (1995), plantas de milho sob déficit hídrico acumulam açúcares solúveis nas folhas, ao mesmo tempo em que ocorre a diminuição na quantidade de amido.

De acordo com o autor, a maior mobilização de sacarose pelas plantas ocorre, mas não de modo generalizado, durante a noite, quando a planta estava relativamente mais hidratada e sujeita as temperaturas mais moderadas. Estudando a determinação dos coeficientes de respiração de crescimento e de manutenção nas raízes e parte aérea em milho e arroz, MACHADO & PEREIRA (1987) concluíram que em todas as cultivares a eficiência em conversão foi maior na parte aérea que nas raízes, enquanto o coeficiente de manutenção das raízes foi sempre maior que da parte aérea. Os autores sugerem, ainda, que a baixa eficiência global de crescimento das raízes está relacionada à necessidade adicional de energia para a absorção iônica, acrescida de baixa eficiência de conversão de energia na respiração das raízes.

BERGAMASCHI et al. (2004) constataram que pode haver redução de rendimento mesmo em anos climaticamente favoráveis, se o déficit hídrico ocorrer no período crítico, ou seja, da pré-floração ao início de enchimento de grãos. Durante o período vegetativo, o déficit hídrico reduz o crescimento do milho, em função de decréscimos da área foliar e da biomassa, porém, nesse período não estão sendo

formados os componentes do rendimento.

Assim, os efeitos sobre a produção de grãos são atenuados posteriormente, se as condições hídricas se tornarem favoráveis, o que poderá garantir níveis satisfatórios de rendimento de grãos. Por outro lado, se a deficiência hídrica ocorrer no período crítico, ou seja, da pré-floração ao início do enchimento de grãos, a recuperação da capacidade produtiva da cultura não poderá ocorrer de forma satisfatória, uma vez que os eventos reprodutivos são muito mais rápidos do que os verificados durante o crescimento vegetativo (MORIZET & TOGOLA, 1984).

Embora seja fundamental avaliar os efeitos do fator água durante todo o ciclo da cultura, vários trabalhos concentraram estudos no impacto do déficit hídrico no período crítico do milho, ou seja, da pré-floração ao início de enchimento de grãos (BERGAMASCHI et al., 2004).

Modelos que permitem estimar o rendimento final do milho foram elaborados apenas utilizando o déficit hídrico ou variáveis derivadas do balanço hídrico, durante o período crítico da cultura. Segundo MEDEIROS et al. (1991), esta estimativa pode ser realizada considerando-se a razão entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima, no período de dez dias antes do pendoamento a dez dias depois do espigamento. MATZENAUER et al. (1983) obtiveram resultados semelhantes para diversos locais do Estado do Rio Grande do Sul, mas consideraram o período do pendoamento até trinta dias depois, como adequado para estimar o rendimento final da cultura. Portanto, os períodos considerados nesses dois trabalhos não se restringiram aos principais eventos reprodutivos do milho, segundo ZINSELMEIER et al. (1995). É importante avaliar o efeito do déficit hídrico em períodos mais restritos e precisos, quando o impacto é mais severo, para salientar as relações de causa-efeito.

A solução deste problema passa pela decisão correta do produtor e pela assistência técnica. É necessário seguir o zoneamento agrícola e adotar práticas como a rotação de

culturas e o escalonamento da semeadura, como medidas de redução de riscos. Outra maneira consiste na utilização da irrigação, principalmente no período crítico da cultura. Segundo BERGAMASCHI et al. (2004), o adequado suprimento hídrico, próximo ao pendoamento e espigamento do milho, é suficiente para que sejam obtidos rendimentos elevados.

CONCLUSÕES

O crescimento, o desenvolvimento e a produtividade final do milho são afetados por condições ambientais específicas durante seu ciclo, principalmente a deficiência hídrica.

Portanto, o fator água é determinante em todo ciclo da cultura, sendo fundamental nos períodos críticos da cultura que vai da pré-floração ao início do enchimento dos grãos. O grau de limitação na produtividade promovido por déficit hídrico varia entre cultivares de milho. Assim, a habilidade de manutenção ou menor redução de processos fisiológicos chaves, tais como a fotossíntese, a transpiração, condutância estomática e acúmulo de osmólitos orgânicos e inorgânicos, durante período de carência hídrica, é um indicativo do potencial produtivo sob essas condições. O melhoramento genético pode contribuir com a cultura por meio da aplicação desse conhecimento na identificação e no desenvolvimento de cultivares tolerantes ao estresse hídrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO.1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANDRADE, F.H. et al. Kernel number determination in maize. *Crop Science*, Madison. v.39, p. 453-459, 1999.
- ASPINALL, D.; PALEG, L.G. Proline accumulation: Physiological aspects. In: PALEG, L.G.; ASPINALL, D. *The physiology*

- and biochemistry of drought resistance in plants. Australia: Academic Press. p. 206-241. 1981.
- BERGAMASCHI, H. et al. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. *Revista Argentina de Agrometeorologia*, Buenos Aires, v. 1, p. 23-27, 2001.
- BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, p. 831-839, 2004.
- BERGONCI, J.I. et al. Condutância foliar como um indicador de déficit hídrico em milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 8, p. 27-34, 2000.
- BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H. *Ecofisiologia do milho*. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis. Anais ... Florianópolis: ABSM/EPAGRI, 2002. CD-ROM.
- BIANCHI, C.A.M. et al. Condutância da folha em milho cultivado em plantio direto e convencional em diferentes disponibilidades hídricas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 37, p.315-322, 2007.
- BIANCHI, C.A.M. et al. Ajuste osmótico em milho cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e disponibilidade hídrica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.40, p.645-651, 2005.
- BONO, L. Efeito do déficit hídrico sobre as respostas estomáticas do milho à radiação fotossinteticamente ativa. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. 95 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/UFRGS, 1997.
- BRAY, E.A. Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science*, Oxford, v.2, p.48-54. 1997.
- BUNCE, J. A. Nonstomatal inhibition of photosynthesis by water stress. Reduction of photosynthesis at high transpiration rate without stomatal closure in field grown tomato. *Photosynthesis Research*, Dordrecht, v. 18, n. 3, p. 357-362, 1988.
- CARLESSO, R. Influence of soil water deficits on maize growth and leaf area adjustments. East Lansing, MI. EUA: Michigan State University. 1993. Ph.D. Thesis.
- CARLESSO, R. et al. Resposta do milho irrigado submetido a diferentes frações de água disponível no solo. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 21, 1996, Londrina. Resumos... Londrina: IAPAR, 1996. 196p.
- CAZETTA, J. et al. Efeito de diferentes tipos de estresse sobre os fatores de produção de grãos em plantas de milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FISILOGIA VEGETAL, 10., 2005, Recife. Anais, 2005, Recife: SBFV, 2005. CD-ROM.
- CEULEMANS, R. et al. Net CO₂ exchange rate as a sensitive indicator of plant water status in corn (*Zea mays* L.). *Canadian Journal of Plant Science*, Ottawa, v. 68, p. 597-606, 1988.
- CRUZ de CARVALHO, M.H. et al. Comparison of the physiological responses of *Phaseolus vulgaris* and *Vigna unguiculata* cultivars when submitted to drought conditions. *Environmental and Experimental Botany*, Oxford, n.3, v. 40, p. 197-207, 1998.
- CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H. Efeito da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Org.). *Agrometeorologia aplicada a irrigação*. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992, p. 85-97.
- FALEIROS, R.R.S. et al. Nutritionally induced changes in endosperm of shrunken-1 and brittle-2 maize kernels grown in vitro. *Crop science*, Madison, v.36, n. 3, p.947-54, 1996.

- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Produção de milho. 1.ed. Guaíba: Agropecuária, 2000. 385p.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Produção de milho. 2.ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360p.
- GADIOLI, J.L. Estimativa de rendimento de grãos e caracterização fitotécnica da cultura de milho (*Zea mays* L). 1999. 86f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- GUEI, R.G.; WASSON, C.E. Inheritance of some drought adaptative traits in maize: I. Interrelationships between yield, flowering, and ears per plant. *Maydica*, Bergamo, v.37, p.157-164, 1992.
- HARRISON, R.D. et al. Net photosynthesis and stomatal conductance of peach seedlings and cuttings in response to changes in soil water potential. *Journal American Society Horticultural Science*, Alexandria, v. 114, p. 986-990, 1989.
- HERRERO, M.P.; JOHNSON, R.R. Drought stress and its effects on maize reproductive systems. *Crop Science*, Madison, v.21, p.105-110, 1981.
- JOHNSON, D.R.; TANNER, J.W. Calculation of the rate and duration of grain filling in corn (*Zea mays* L.). *Crop Science*, Madison, v.12, p.485-486, 1972.
- JONES, H.G. Physiological mechanisms involved in the control of leaf water status: implications for the estimation of tree water status. *Acta Horticulturae*, Pisa, v.171, p.291-296, 1985.
- KINIRY, J.R.; BONHOMME, R. Predicting maize phenology. In: HODGES, C. (Ed.). *Predicting crop phenology*. Boca Raton: CRC Press, Ann. Arbor. Boston. p. 115- 131, 1991.
- LOZADA, B.I.; ANGELOCCI, L.R. Efeito da temperatura do ar e da disponibilidade hídrica do solo na duração de subperíodos e na produtividade de um híbrido de milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 7, p. 37-43, 1999.
- MACHADO, E.C.; LAGÔA, A.M.M.A. Trocas gasosas e condutância estomática em três espécies de gramíneas. *Bragantia*, Campinas, v. 53, p. 141- 149, 1994.
- MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R. Determinação dos coeficientes de respiração de crescimento e de Manutenção em raízes e parte aérea em milho e arroz. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FISILOGIA VEGETAL, 1., 1987, Londrina. Resumos, 1987, Londrina: IAPAR, 1987. p.90.
- MAGALHÃES, A.C.N. Fotossíntese, particionamento de assimilados e crescimento de plantas sob condições de estresse: com destaque para o milho. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTRESSE AMBIENTAL, 1, 1992, Belo Horizonte. Resumos... Sete Lagoas: EMBRAPA/CNPMS. México: CIMMYTIUNDP, 1995. p.195-221.
- MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M, PAIVA, E. Fisiologia da produção de milho. Sete Lagoas: EMBRAPA - CNPMS, 1995. 27p. (EMBRAPA - CNPMS. Circular Técnica, 20).
- MATZENAUER, R. et al. Relações entre a evapotranspiração do milho e as fórmulas de Penman e Thornthwaite. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.18, p.1207-1214, 1983.
- 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).
- MEDEIROS, S.L.P. et al. Relações entre a evapotranspiração e rendimento de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 26, p. 1-10, 1991.

- MORIZET, J.; TOGOLA, D. Effect et arrière-effect de la sécheresse sur la croissance de plusieurs génotypes de maïs. In: CONFÉRENCE INTERNATIONALE DES IRRIGATIONS ET DU DRAINAGE, 1984, Versailles. Les besoins en eau des cultures. Paris: Institut National de la Recherche Agronomique, 1984. p. 351-360.
- OTEGUI, M. E.; ANDRADE, F.H. New relationships between light interceptions, ear growth, and kernel set in maize. In: WESTGATE, M.E.; BOOTE, K. (Ed.). Physiology and modeling kernel set in maize. Madison: Crop Science Society of America and American Society of Agronomy, 2000. p.89-102. (Special Publication, 29).
- PEREIRA, P.G. et al. Efeitos de diferentes níveis de déficit hídrico na fotossíntese e condutância foliar em milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 11, p. 53-62, 2003.
- PREMACHANDRA, G.S. et al. Osmotic adjustment and stomatal response to water deficit in maize. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 43, n. 256, p. 1451-1456, 1992.
- QUATTAR, S. et al. Effect of water deficit during grain filling on the pattern of maize kernel growth and development. *Crop Science*, Madison, v.27, p.726-730, 1987.
- RADIN, J.W.; ACKERSON, R.C. Does abscisic acid control stomatal closure during water stress? *What's New in Plant Physiology*, Gaithersburg, v. 13, p. 9-12, 1982.
- REICHARDT, K.; TIMM, C.L. Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, processos e aplicações. Editora Manole Ltda. Barueri-SP. 2004. 478p.
- REZENDE, R. et al. Função de produção da cultura do milho e do feijão para diferentes lâminas e uniformidade de aplicação de água. *Acta Scientiarum: Agronomia*, Maringá, v. 26, p. 503-511, 2004.
- RITCHIE, S.W. et al. Como a planta de milho se desenvolve. Piracicaba: POTAFOS, 2003. 20p. (Informações Agronômicas, 103).
- SERRAJ, R.; SINCLAIR, T.R. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? *Plant, Cell and Environment*, Malden, v.25, p.333-341, 2002.
- SHAW, R.H. Climatic requirements. In: *Corn and corn improvement*. Madison: Wisconsin, American Society of Agronomy, Publisher, 1977. p.591-623 (Serie Agronomy, 18).
- SILVA, J.B.C. et al. Identificação de genótipos de sorgo tolerantes à toxicidade de alumínio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.7, p.77-83. 1984.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.
- TERAMOTO, E.R. Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) baseados em parâmetros do solo e do clima. 2003, 85p. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2003.
- WANG, G. et al. Genetic analyses of grain-filling rate and duration in maize. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 61, p. 211-222, 1999.
- WESTGATE, M.E. Water status and development of the maize endosperm and embryo during drought. *Crop Science*, Madison, v.34, p.76-83, 1994.
- ZINSELMEIER, C. et al. Kernel set at low water potential does not vary with source/sink ratio in maize. *Crop Science*, Madison, v.35, p.158-163, 1995.

