

Produtividade

Fatores de estresse no milho são diversos e exigem monitoramento constante

Gustavo Maia Souza e Alexandrius de Moraes Barbosa*

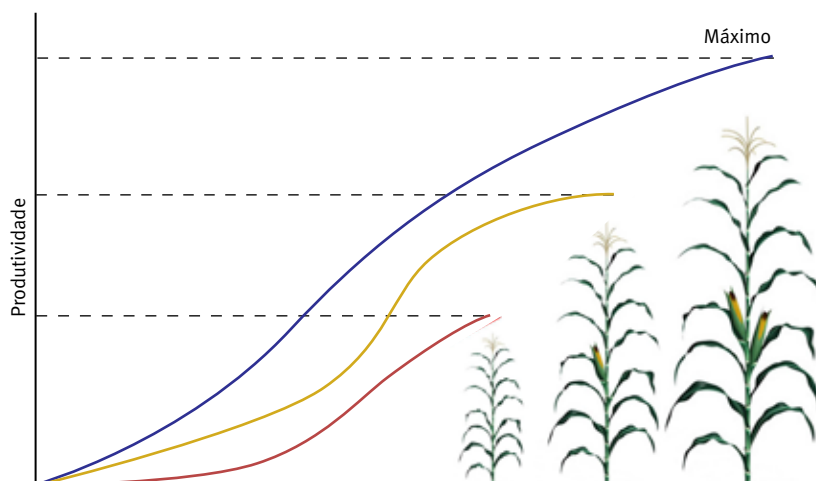
RODRIGO ALMEIDA



Fatores bióticos e abióticos podem causar situações de estresse nas plantas, resultando em redução da produtividade

FIGURA 1 | VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE COMO PRODUTO DA RELAÇÃO ENTRE O MATERIAL GENÉTICO E O FENÓTIPO DO CULTIVAR, EM DADO AMBIENTE DE PRODUÇÃO

$$\Delta \text{ PRODUTIVIDADE} = (\text{GENÓTIPO} \times \text{FENÓTIPO}) \times \text{AMBIENTE}$$



O cultivo do milho no Brasil é realizado principalmente na região Centro-Sul. Na safra 2013/14, a área plantada de milho correspondeu, na primeira safra, a 41,8% da área total nacional; já o milho de segunda safra correspondeu a 58,2%. O cultivo do milho de primeira safra, na região Centro-Sul, é realizado no verão, compreendendo o período de outubro a fevereiro. Já o cultivo do milho de segunda safra é realizado após a cultura de verão (normalmente a soja), compreendendo o período de fevereiro a julho. Em ambas as épocas de cultivo, as plantas de milho estão expostas a diversos fatores bióticos e abióticos que podem causar perturbações no estado fisiológico normal das plantas, podendo ocasionar situações de estresse.

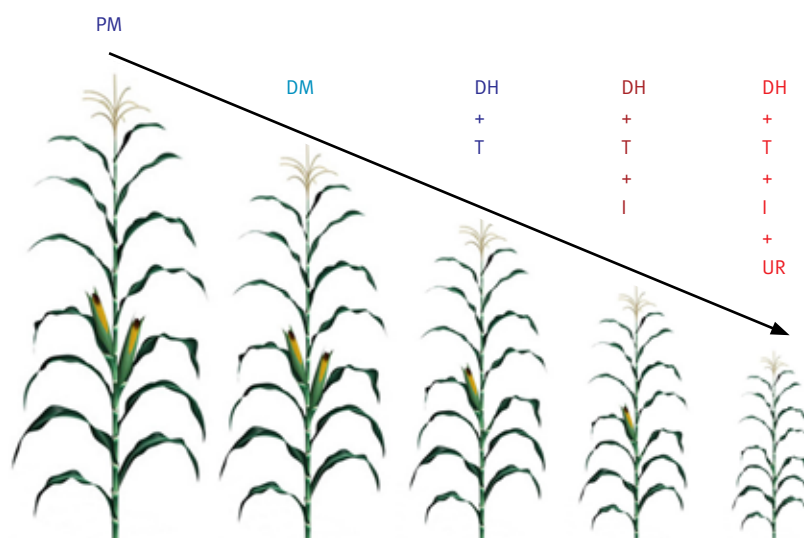
Do ponto de vista agrônomo, o estresse é uma condição de perturbação do desenvolvimento das plantas causado pelo ambiente de produção, que resulta em redução da produtividade. Seu efeito específico sobre a produtividade das culturas depende da interação entre três componentes básicos: o genótipo (informações genéticas típicas de cada material), o fenótipo (características fisiológicas e morfológicas das plantas) e a variabilidade dos fatores bióticos e abióticos do meio (Figura 1). Dentre os fatores

bióticos que podem levar as plantas ao estresse, pode-se citar o ataque de pragas e doenças que causam grandes alterações nos processos fisiológicos das plantas. No entanto, os fatores que estão mais ligados à redução da produtividade da cultura do milho são os fatores abióticos relacionados ao clima (disponibilidade hídrica do solo, temperatura do ar, umidade relativa do ar e irradiação solar).

As consequências do estresse para o crescimento da planta dependem da severidade (intensidade) do fator causador do estresse, bem como da duração da perturbação, do número de exposições da planta ao fator de estresse durante seu ciclo de cultivo, do estágio de desenvolvimento da planta e do genótipo selecionado. Porém, na realidade prática do cultivo a campo, as plantas nunca estão expostas somente a um fator de estresse, mas, sim, a uma combinação de vários fatores que as levam a diferentes níveis de estresse. Por exemplo, a baixa disponibilidade de água no solo pode induzir o estresse, porém, quando a baixa disponibilidade de água está associada à elevada temperatura do ar, alta irradiação e baixa umidade, o estresse é mais intenso e severo em relação a um ambiente com o mesmo nível de disponibilidade hídrica, mas com temperaturas mais amenas (Figura 2).

Por outro lado, as plantas sempre apresentam algum nível de resposta de defesa, baseada em três estratégias diferentes: a primeira é a resistência ao estresse ou resposta homeostática, que é a tentativa de manter seu equilíbrio fisiológico.

FIGURA 2 | EFEITO DOS FATORES DE ESTRESSE SOBRE A PRODUTIVIDADE DO MILHO



Obs.: Potencial máximo da cultura (PM), déficit hídrico (DH), temperatura (T), irradiação (I) e umidade relativa do ar (UR); o estresse severo ocorre quando há a combinação de vários fatores de estresse.

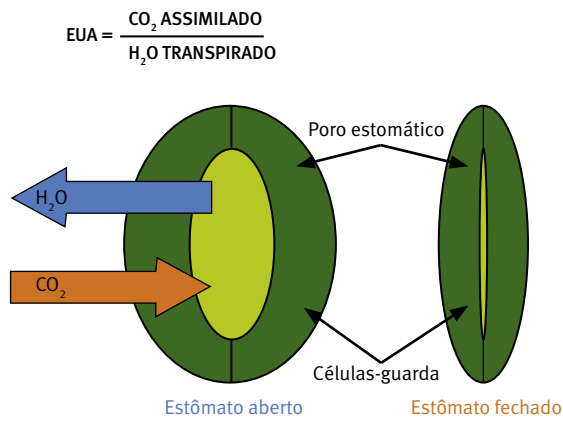


Variações na produção dependem do genótipo da variedade, do ambiente de produção e das respostas fisiológicas obtidas

Em geral, esta estratégia envolve elevado custo metabólico, com aumento da respiração para prover energia aos processos de manutenção fisiológica e reparo de danos celulares. A segunda estratégia é a tolerância ao estresse; neste caso, a planta possui maior plasticidade, convivendo com os fatores de estresse com menor gasto energético, promovendo recuperação mais eficiente após a perturbação. A terceira estratégia é a “evitância”; nesse caso, a planta evita o estresse, por exemplo, investindo previamente na formação de um sistema de raízes profundo e ramificado, que será mais eficiente na absorção de água e nutrientes. Dependendo do material genético, estas três estratégias assumem diferentes papéis, durante o ciclo da cultura, em função da variabilidade do ambiente de produção.

De forma geral, podemos entender que a variação da produção de uma cultura depende: 1) do genótipo do material, que estabelece o nível de potencial máximo de produção; 2) do ambiente de produção, que impõe limites ao desenvolvimento da expressão do potencial da cultura; e 3) das respostas fisiológicas

FIGURA 3 | ABERTURA E FECHAMENTO DO PORO ESTOMÁTICO REFLETINDO A “EFICIÊNCIA NO USO DE ÁGUA” (EUA), DA PLANTA*



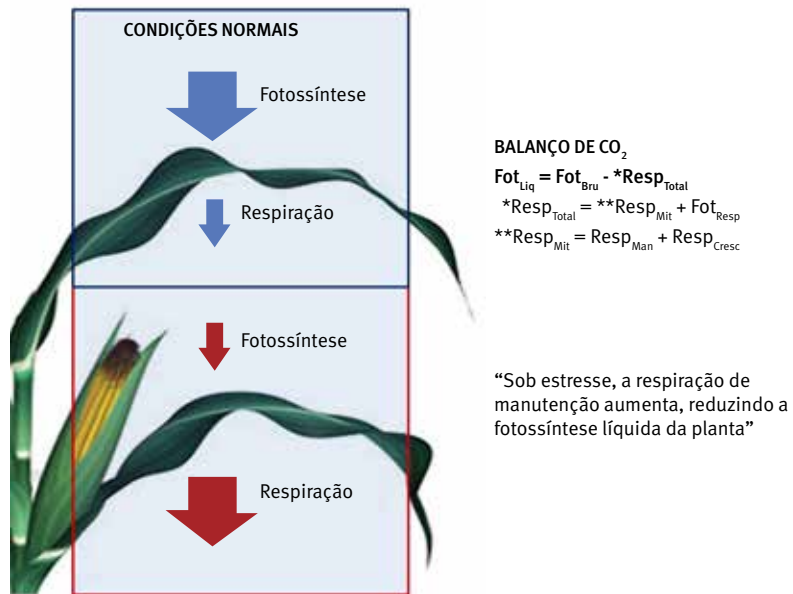
*Refere-se à quantidade de água gasta para assimilar uma certa quantidade de carbono

das plantas aos desafios impostos pelo ambiente (Figura 1). Portanto, a compreensão de como os fatores ambientais podem induzir as plantas ao estresse é fundamental para o estabelecimento de manejo adequado da cultura e para a escolha do cultivar mais apropriado à região de produção. Esta é uma tarefa bastante complexa, pois normalmente as

plantas estão expostas a diversos fatores de estresse, envolvendo a necessidade de técnicas adequadas para o monitoramento constante do estado fisiológico das culturas ao longo de seu ciclo.

Na cultura do milho, a combinação dos fatores de estresse se dá de maneira diferente, em cada época de cultivo. No milho de primeira safra, a combinação das altas

FIGURA 4 | BALANÇO DE CARBONO NA CULTURA DO MILHO



Obs.: Fotossíntese líquida (Fot_{Liq}), fotossíntese bruta (Fot_{Bru}), respiração total ($Resp_{Total}$), respiração mitocondrial ($Resp_{Mit}$), fotorespiração ($Foto_{Resp}$), respiração de manutenção ($Resp_{Man}$), respiração de crescimento ($Resp_{Cresc}$)

temperaturas do ar, alta irradiação e, em algumas situações, a baixa disponibilidade de água são os principais fatores causadores de estresse. Já no milho de segunda safra, a combinação das baixas temperaturas do ar, baixa disponibilidade de água, baixa umidade relativa do ar e os baixos níveis de irradiação reduz o desenvolvimento e a produtividade da cultura. Em termos globais, a falta de água é responsável pelas maiores perdas de produtividade das culturas. O efeito do estresse causado pela baixa disponibilidade de água é complexo, pois, normalmente, as plantas não estão expostas somente ao déficit hídrico. Na maioria das regiões produtoras de milho, além do déficit hídrico, as plantas estão expostas também a altos níveis de irradiação e à alta temperatura do ar, fatores que aumentam a evapotranspiração, intensificando ainda mais o efeito da falta de água na planta (Figura 2).

Em relação aos períodos de cultivo do milho na região Centro-Sul, o déficit hídrico tem menor impacto na produção do milho de primeira safra, pois o cultivo nesta época coincide com o período chuvoso e quente. Durante o cultivo da primeira safra, a disponibilidade de água normalmente é alta, bem como ocorre boa distribuição pluviométrica. Além desses fatores, nesta época há maior disponibilidade de energia, pelo aumento da irradiação, e as temperaturas médias do ar são mais altas, fatores que estimulam o desenvolvimento das plantas. Já no milho de segunda safra, o impacto do déficit hídrico é maior, pois a semeadura coincide com o término do período chuvoso. Nesta situação, quanto mais tardia for a semeadura, maior será o risco de déficit hídrico durante o desenvolvimento da cultura. Além do fim do período chuvoso, o plantio de segunda safra coincide com a redução do fotoperíodo e a consequente redução da irradiação solar e temperatura do ar, fatores climáticos que também podem levar a planta ao estresse.

A redução na produtividade causada pelo efeito do déficit hídrico pode ser de origem estomática ou não-estomática (bioquímica e fotoquímica). O efeito de origem estomática está relacionado, diretamente, ao fechamento dos poros estomáticos. A planta, ao perceber a redução do potencial de água do solo, gera um sinal para as folhas via ácido abscísico (ABA) pela corrente transpiratória, induzindo ao fechamento dos estômatos, de modo a reduzir a perda de água através da transpiração. Porém, ao mesmo tempo em que ocorre a redução da perda de água, também ocorre a redução na assimilação do CO₂ atmosférico, causando redução nas taxas fotossintéticas, devido à menor disponibilidade de CO₂ intercelular, e refletindo-se na “eficiência do uso da água” (EUA) pela planta; isto é, a quantidade de água gasta para assimilar uma certa quantidade de carbono (Figura 3). A EUA é uma das principais características para a escolha de cultivares adaptados à falta de água.

Quanto à redução na produtividade relacionada aos efeitos de origem não-estomática, o déficit hídrico pode afetar os processos bioquímicos da fotossíntese (responsáveis pela fixação do carbono atmosférico) e o aparato fotoquímico da planta (responsável pela absorção de luz e produção de energia para a fotossíntese). Em relação ao metabolismo bioquímico, a redução da taxa fotossintética em plantas sob déficit hídrico é causada, principalmente, pela redução da eficiência das enzimas responsáveis pela fixação do CO₂, a PEPcase (fosfoenolpiruvato carboxilase, específica de plantas de metabolismo tipo C₄, como o milho) e a Rubisco (ribulose bifosfato carboxilase/oxigenase, a proteína mais abundante em todas as plantas). Sob déficit hídrico, ocorre a degradação e/ou inativação destas enzimas, acarretando a redução da fixação do CO₂ e, conseqüentemente, a redução na produtividade das culturas.

O déficit hídrico pode afetar, também, a eficiência fotoquímica das plantas. Normalmente, isso acontece em situações de déficit hídrico severo combinado com altos níveis de irradiação solar, que causam queda significativa na eficiência da fotossíntese, em função da redução do transporte de elétrons (fotoinibição do fotossistema II), em virtude do excesso de elétrons e da degradação da membrana dos cloroplastos. O efeito da temperatura do ar sobre o desenvolvimento do milho varia em função da época de cultivo e, também, da região – devido à altitude. No milho de primeira safra, o maior efeito da temperatura do ar se dá em regiões de baixa altitude, onde a temperatura do ar é maior. A maior temperatura do ar diurna aumenta a transpiração das plantas, causando maior perda de água pelas plantas. Porém, o maior efeito da temperatura do ar no cultivo do milho de primeira safra em regiões de baixa altitude se dá pelo aumento da respiração noturna; neste caso, ocorre o aumento da respiração de manutenção das plantas e parte dos fotoassimilados (que seriam utilizados na respiração para suprir a energia para o crescimento) acaba sendo utilizada no reparo e na manutenção do metabolismo da planta, de modo a evitar que entre em estresse severo. Por fim, a maior temperatura do ar noturna reduz a assimilação líquida de carbono diária (Figura 4) e, conseqüentemente, reduz o desenvolvimento e a produtividade da cultura.

Sendo assim, o cultivo do milho de primeira safra, em regiões com maiores altitudes, reduz o risco de as plantas entrarem em estresse térmico, devido à redução da temperatura noturna do ar. No cultivo do milho de segunda safra, a baixa temperatura do ar pode causar grande redução da produtividade da cultura, principalmente em regiões de alta altitude. O cultivo do milho de segunda safra coincide com o período da redução do fotoperíodo, da irradiação solar e, conseqüentemente, da redução

da temperatura do ar. Neste caso, quando o milho é cultivado em regiões de alta altitude, o risco de as plantas entrarem em estresse térmico pelas baixas temperaturas é maior; portanto, no milho de segunda safra, áreas com baixas altitudes são consideradas mais favoráveis ao desenvolvimento da planta, devido à maior temperatura do ar e ao menor risco de geadas durante o ciclo da cultura.

A baixa temperatura do ar afeta diretamente o metabolismo fotossintético das plantas, reduzindo a eficiência das enzimas PEPcase e Rubisco, responsáveis pela fixação de carbono na planta. Percebe-se, portanto, que diferentes fatores climáticos geram efeitos diretos no balanço de carbono das plantas, afetando sua produtividade. O balanço de carbono resulta da diferença entre a quantidade de CO₂ fixada pela planta pela fotossíntese, durante o período luminoso, e o gasto total de CO₂ pela respiração, que supre a planta de energia na forma de ATP (adenosina trifosfato), para a formação de novos tecidos (crescimento) e/ou para manutenção e reparo do metabolismo celular. Assim, quanto mais adversas forem as condições ambientais, menor será a fotossíntese, ao mesmo tempo em que haverá aumento do gasto de energia para os reparos celulares, promovendo redução do balanço de carbono na planta e diminuindo a produtividade (Figura 4).

Independentemente do tipo do estresse (hídrico, térmico ou luminoso), a redução na eficiência fotossintética é causada pelo excesso de energia dentro da planta; mais especificamente, pelo excesso de elétrons no interior celular que, em combinação com o oxigênio nas células, forma as EROs (espécies reativas de oxigênio). As EROs são produtos altamente tóxicos que causam danos à integridade e funcionalidade celular, por meio da peroxidação de lipídios, oxidação de proteínas, DNA e outras moléculas orgânicas vitais ao funcionamento das plantas. Portanto, o principal efeito dos fatores de estresse na produtividade da

cultura está relacionado à formação das EROs, que, em situações mais severas, causam a morte celular.

No entanto, a planta possui um conjunto de enzimas antioxidantes que minimizam ou até anulam os efeitos causados pelas EROs. Dentre as enzimas mais estudadas, podem-se citar o superóxido dismutase (SOD), a catalase (CAT), o ascorbato peroxidase (APX), o dehidroascorbato redutase (DHAR), o monodehidroascorbato redutase (MDHAR), a glutathione redutase (GR) e a glutathione peroxidase (GPx). Esse conjunto de enzimas, aliado a outros agentes antioxidantes – como a prolina e o ácido salicílico –, auxilia as plantas a sobreviverem em condições de estresse, por longos períodos. O conhecimento de como os fatores climáticos podem afetar os processos fisiológicos das plantas de milho auxilia no correto manejo da cultura, de modo a minimizar os efeitos causados pelos fatores de estresse. A identificação de genótipos resistentes e/ou tolerantes é uma das estratégias mais eficientes para amenizar os efeitos do estresse nas plantas, como também conhecer e respeitar o zoneamento agrometeorológico de cada região de cultivo, tendo especial atenção para o balanço hídrico, as temperaturas médias do ar, a latitude, a altitude e o período de semeadura da cultura. 🌱

* **Gustavo Maia Souza** é docente no Departamento de Botânica da Universidade Federal de Pelotas (gumaia@pq.enpq.br); **Alexandrius de Moraes Barbosa** é docente na Universidade do Oeste Paulista (alexandrius@unioeste.br).