



Milho

Cultivo do Milho

Sumário

Ecofisiologia

Dados Sistema de Produção

Embrapa Milho e Sorgo

Sistema de Produção, 1

ISSN 1679-012X 1

Versão Eletrônica
9ª edição | Nov/2015



Cultivo do Milho

Ecofisiologia

Introdução

O milho é uma gramínea pertencente à família *Poaceae*, e sua espécie é a *Zea mays* L. Todos os milhos estão incluídos nessa única espécie e pertencem à tribo *Maydeae*, que possui sete gêneros, dos quais dois são nativos do hemisfério ocidental (*Zea* e *Tripsacum*) e cinco da Ásia. Calcula-se que seja a América Central ou o México a sua região de origem, tendo sido desenvolvido há 8 ou 10 mil anos (Paterniani et al., 2000). O caráter monoico e a sua morfologia característica resultam da supressão, condensação e multiplicação de várias partes da anatomia básica das gramíneas. Os aspectos vegetativos e reprodutivos da planta de milho podem ser modificados através da interação com os fatores ambientais que afetam o controle da ontogenia do desenvolvimento. Contudo, o resultado geral da seleção natural e da domesticação foi produzir uma planta anual, robusta e ereta, com um a quatro metros de altura, que é esplendidamente “construída” para a produção de grãos.

O milho é uma das mais eficientes plantas armazenadoras de energia existentes na natureza, devido à sua grande capacidade de acumulação de fotoassimilados (Baldo, 2007). De uma semente que pesa pouco mais de 0,3 g irá surgir uma planta geralmente com mais de 2,0 m de altura, isto dentro de um espaço de tempo de cerca de nove semanas. Nos meses seguintes, essa planta produz cerca de 600 a 1.000 sementes similares àquela da qual se originou (Aldrich et al. 1982).

Com relação ao período de cultivo o Brasil, país tropical, leva grande vantagem se comparado às condições de clima temperado, no qual esse período é bem definido e relativamente curto. Contudo, existem desvantagens dos ambientes tropicais como a imprevisibilidade das condições climáticas e as variações bastante acentuadas tanto em regiões como entre anos (Paterniani et al., 2000). Com o avanço das mudanças climáticas provavelmente estaremos podendo verificar maiores modificações no ambiente (Pinto & Assad, 2008). Com essas modificações, o estudo da fisiologia das plantas, em particular o milho, torna-se muito importante e necessário principalmente para identificar quais caminhos ou como o ambiente afeta a planta de milho e assim incrementar ferramentas que auxiliam nos estudos de melhoramento para uma maior produção/produzividade do milho.

Para entendermos a reação da planta de milho a um fator ambiental, ou seja, certa influência do meio externo e em uma dada situação é necessário dividir estes fatores em natureza biótica e abiótica. Todos esses fatores determinam o crescimento e desenvolvimento da planta. Fatores ambientais bióticos são aqueles resultados de uma interação de organismos como efeito de simbiose, parasitismo, herbivoria, infecção e outros (Schulze et al., 2005). Já os fatores ambientais de natureza abiótica incluem os fatores físicos como a temperatura, intensidade da luz, umidade, oferta de nutrientes e outros.

Esses fatores podem beneficiar as plantas (por exemplo, o vento é um fator abiótico importantíssimo na polinização do milho) ou podem levar a danos (diminuição da produção de grãos ou de biomassa de milho pela falta de água ou por pragas) dependendo da sua intensidade (quantidade). Uma planta em casa de vegetação pode estar vivendo em uma "condição ótima" com todos os fatores abióticos na quantidade ideal (quantidade ideal de luz, água, temperatura etc...) tendo assim uma maximização da sua fisiologia/performance chegando a um estado fisiológico normal. Quando há um desvio deste estado fisiológico normal temos o conceito de estresse. O conceito de estresse é baseado em um princípio físico de Levitt (1980) que até hoje é aplicado para todos os organismos vivos: um corpo é deformado por uma força (estresse). As alterações (deformações) do corpo causado por esta força são chamadas de tensão. Essa deformação ou tensão é primeiramente reversível (força elástica); entretanto, sob uma força intensa, esta deformação torna-se irreversível (força plástica). Por isso, o estresse são as condições ambientais que levam um organismo a entrar num estado de tensão. Essas tensões seriam as modificações morfofisiológicas que podem levar (nem sempre) a um dano no organismo (Schulze et al., 2005).

Levando em conta os dois fatores ambientais citados acima, podemos então ter estresse abiótico e biótico. Se compararmos as perdas causadas por estresses bióticos, as perdas por estresses abióticos causam bem mais reduções mundiais em relação à produtividade das culturas (Bray, 2004).

2. Importância da cultura do milho

O milho é uma das plantas cultivadas de maior interesse, quanto à sua origem, estrutura e variação. Somente é conhecido em cultivo e, na sua forma atual, não apresenta indicativos de que poderia subsistir sem os cuidados do homem. A pesquisa tem desenvolvido tipos tão diferentes de milho que seu cultivo é possível desde o Equador até o limite das terras temperadas e desde o nível do mar até altitudes superiores a 3.600 metros. Essa adaptabilidade, representada por genótipos variados, é paralela à variedade de sua utilização como alimento, forragem ou na indústria.

As Tabelas 1 e 2 refletem bem a importância da cultura do milho no Brasil, onde se pode apreciar nas diversas regiões do país e estados produtores a área plantada, a produção em toneladas, assim como o rendimento nas duas safras: a normal (primeira safra) e a safrinha (segunda safra), respectivamente. Este levantamento realizado pela CONAB se refere aos anos agrícolas 2009/2010 e 2010/2011.

Tabela 1. Comparativo de área, produção e rendimento de milho (1ª safra) nos estados/regiões brasileiras. Safras 2009/2010 e 2010/2011.

Região/ UF	Área (Em mil ha)		Produção (Em mil t)		Produtividade (Em kg ha ⁻¹)	
	09/10	10/11	09/10	10/11	09/10	10/11
RR	6,5	6,5	12,8	12,9	1.969	1.990
RO	104,8	111,4	214,7	236,7	2.049	2.125
AC	29,8	29,0	57,8	52,8	1.992	1.822
AM	12,8	14,0	31,9	35,0	2.490	2.500
AP	3,6	3,6	3,3	3,1	903	860
PA	217,8	196,0	540,6	498,2	2.482	2.542
TO	66,9	61,6	232,5	202,2	3.476	3.283
Norte	441,4	422,1	1.093,6	1.040,9	2.477	2.466
MA	382,4	384,4	562,1	618,9	1.470	1.610
PI	309,9	344,9	353,6	715,3	1.141	2.074

CE	535,6	775,0	175,1	944,0	327	1.218
RN	37,0	37,0	9,2	23,5	248	635
PB	69,6	69,6	6,3	53,0	91	762
PE	272,5	273,9	125,6	175,3	461	640
AL	58,0	58,0	41,8	38,0	720	655
SE	176,8	176,8	722,8	675,1	4.088	3.820
BA	451,9	474,9	1.619,6	1.806,0	3.584	3.803
Nordeste	2.293,7	2.594,5	3.616,1	5.049,4	1.577	1.946
MT	85,2	50,2	409,0	302,9	4.800	6.033
MS	57,5	41,7	375,8	279,4	6.535	6.700
GO	377,6	393,5	2.643,2	2.793,9	7.000	7.100
DF	25,7	22,2	200,6	169,5	7.805	7.635
Centro-O.	546,0	507,6	3.628,3	3.545,7	6.646	6.985
MG	1.164,9	1.149,2	5.920,0	5.936,8	5.082	5.166
ES	34,5	33,9	74,2	66,3	2.151	1.957
RJ	7,0	7,4	17,5	18,3	2.507	2.473
SP	597,9	555,4	3.470,2	3.275,7	5.804	5.898
Sudeste	1.804,3	1.745,9	9.481,9	9.227,1	5.255	5.325
PR	894,1	727,8	6.866,7	5.342,1	7.680	7.340
SC	593,5	549,2	3.798,4	3.465,5	6.400	6.310
RS	1.151,0	1.143,3	5.593,9	5.316,3	4.860	4.650
Sul	2.638,6	2.420,3	16.259,0	14.123,9	6.162	5.836
Brasil	7.724,0	7.690,4	34.079,2	33.057,0	4.412	4.298

Fonte: CONAB (Levantamento: Março/2011)

Tabela 2. Comparativo de área, produção e produtividade de milho (2ª safra) nos estados e regiões brasileiras. Safras 2009/2010 e 2010/2011.

Região/ UF	Área (Em mil ha)		Produção (Em mil t)		Produtividade (Em kg ha ⁻¹)	
	09/10	10/11	09/10	10/11	09/10	10/11
RO	61,8	61,8	159,4	186,6	2.580	3.020
TO	10,8	11,6	33,4	34,6	3.091	3.065
Norte	72,6	73,1	192,8	221,2	2.656	3.027
BA	328,0	328,0	607,5	523,2	1.852	1.595
Nordeste	328,0	328,0	607,5	523,2	1.852	1.595
MT	1.904,9	1.790,6	7.709,1	7.341,5	4.047	4.100
MS	830,0	933,8	3.361,5	3.501,8	4.050	3.750
GO	434,9	459,7	2.152,8	2.275,5	4.950	4.950

DF	7,5	7,5	54,8	39,7	7.304	5.290
Centro-O.	3.177,3	3.191,6	13.278,2	13.158,5	4.179	4.123
MG	27,4	32,2	163,6	194,3	5.971	6.034
SP	281,6	281,6	1.070,1	1.003,9	3.800	3.565
Sudeste	309,0	313,8	1.233,7	1.198,2	3.993	3.818
PR	1.356,0	1569,8	6.576,6	6.863,2	4.850	4.372
Sul	1.356,0	1569,8	6.576,6	6.863,2	4.850	4.372
Brasil	5.242,9	5.476,3	21.888,8	21.964,3	4.175	4.011

Fonte: CONAB (Levantamento: Março/2011)

A cultura do milho encontra-se amplamente disseminada no Brasil. Isto se deve tanto à sua multiplicidade de usos na propriedade rural quanto à tradição de cultivo desse cereal pelos agricultores brasileiros.

No âmbito tecnológico, o comportamento de aversão ao risco, a baixa disponibilidade de capital para custeio e menor ainda para investimento, o grau de instrução formal geralmente baixo, a comercialização fortemente vinculada a intermediários e o alto grau de consumo na fazenda são características geralmente associadas à condição de pequeno produtor.

Diferenças nos rendimentos agrícolas devem-se a fatores climáticos e econômicos, e ao estoque de conhecimento disponível e disseminado entre os agricultores (no que se refere ao uso de insumos e práticas culturais).

A partir do início da década de 70 até recentemente, em face de fatores como o crescimento da indústria de rações e das atividades de criação (principalmente avicultura, suinocultura e pecuária leiteira), o consumo interno de milho cresceu consideravelmente (CONAB, 2011).

3. Identificação dos estádios de crescimento/desenvolvimento

Para um eficiente manejo de irrigação, de nutrientes e de outras práticas culturais, é de fundamental importância o conhecimento das diferentes fases de crescimento do milho com suas diferentes demandas e respectivos manejos culturais. Assim, é importante enfatizar os diversos estádios de crescimento da planta de milho, desde a sua emergência até a maturidade fisiológica.

As considerações feitas a seguir se referem a um genótipo de milho de ciclo normal, cuja floração acontece aos 65 dias após a emergência.

Todas as plantas de milho seguem um mesmo padrão de desenvolvimento; porém, o intervalo de tempo específico entre os estádios e o número total de folhas desenvolvidas pode variar entre diferentes híbridos, ano agrícola, data de plantio e local.

O sistema de identificação empregado divide o desenvolvimento da planta em vegetativo (V) e reprodutivo (R) conforme mostra a Tabela 3. Subdivisões dos estádios vegetativos são designados numericamente como V_1 , V_2 , V_3 até V_n ; onde (n) representa a última folha emitida antes do pendoamento (V_T). O primeiro e o último estágio V são representados, respectivamente, por (V_E , emergência) e (V_T , pendoamento).

Tabela 3. – Estádios Vegetativos e Reprodutivos da Planta de Milho.

VEGETATIVO	REPRODUTIVO
V _E , emergência	R ₁ , Embonecamento
V ₁ , 1ª folha desenvolvida	R ₂ , Bolha d'água
V ₂ , 2ª folha desenvolvida	R ₃ , Leiteoso
V ₃ , 3ª folha desenvolvida	R ₄ , Pastoso
V ₄ , 4ª folha desenvolvida	R ₅ , Formação de dente
V _(n) , nª folha desenvolvida	R ₆ , Maturidade Fisiológica
V _T , pendoamento	

Fonte: Magalhães e Durães (2002).

Durante a fase vegetativa, cada estágio 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 (Figura 1) e, portanto, é contada como tal. Esse sistema é semelhante ao utilizado por Ritchie & Hanway, (1989).

Foto: Adaptação sobre imagem de Ritchie & Hanway(1989).



Figura 1: Duas profundidades de plantio, mostrando detalhes do alongamento do mesocotilo.

3.1 Germinação e Emergência

Estádio V_E - Em condições normais de campo, as sementes plantadas absorvem água, incham e começam a crescer. A radícula é a primeira a se alongar, seguida pelo coleoptilo com plúmula incluída. O estágio V_E é atingido pela rápida alongação do mesocótilo o qual empurra o coleoptilo em crescimento

para a superfície do solo. Em condições de temperatura e umidade adequada, a planta emerge dentro de 4 a 5 dias; porém, em condições de baixa temperatura e pouca umidade, a germinação pode demorar até duas semanas ou mais. Assim que a emergência ocorre e a planta expõe a extremidade do coleoptilo, o mesocótilo para de crescer.

O sistema radicular seminal, que são as raízes oriundas diretamente da semente, podendo também ser divididas em raízes seminais e primárias (Hochholdinger & Tuberosa, 2009), tem o seu crescimento nesta fase, e a profundidade onde elas se encontram depende da profundidade do plantio. O crescimento dessas raízes, também conhecido como sistema radicular temporário, diminui após o estágio V_E e é praticamente não existente no estágio V_3 .

O ponto de crescimento da planta de milho, neste estágio está localizado cerca de 2,5 a 4,0 cm abaixo da superfície do solo e se encontra logo acima do mesocótilo. Essa profundidade onde se acha o ponto de crescimento é também a profundidade onde vai originar o sistema radicular definitivo do milho, conhecido como raízes nodais ou fasciculadas. A profundidade do sistema radicular definitivo independe da profundidade de plantio, uma vez que a emergência da planta vai depender do potencial máximo de alongamento de mesocótilo, conforme pode ser visto na Figura 2 (Ritchie & Hanway, 1989).

Foto: Paulo Cesar Magalhães.



Figura 2. Estádio de três folhas.

O sistema radicular nodal se inicia, portanto, no estágio V_E e o alongamento das primeiras raízes se inicia no estágio V_1 indo até o R_3 , após o qual muito pouco crescimento ocorre (Magalhães et al. 1994).

No milho, não é constatada a presença de fatores inibitórios ao processo de germinação, visto que, sob condições ótimas de umidade, os grãos podem germinar imediatamente após a maturidade fisiológica mesmo ainda estando presos a espiga.

Em síntese, na germinação ocorre a embebição da semente, com a consequente digestão das substâncias de reserva, síntese de enzimas e divisão celular.

Baixa temperatura no plantio, geralmente, restringe absorção de nutrientes do solo e causa lentidão no crescimento (Sangoi et al., 2004). Esse fato pode ser parcialmente superado por uma aplicação de pequena quantidade de fertilizante no sulco de plantio, ao lado ou abaixo da semente (Aldrich et al. 1982). Contudo, existem também genótipos de milho com grandes potenciais para a tolerância a baixas temperaturas que conseguem germinar nessas condições, sendo muito importantes para as regiões frias do Brasil (Cruz et al., 2007).

O tamanho da cariopse pode influenciar positivamente na germinação e no crescimento inicial das plântulas, porém há resultados contrários e outros ainda mostrando que também pode haver efeito significativo no rendimento de grãos (Sangoi et al., 2004).

A lentidão na germinação predispõe a semente e a plântula a uma menor resistência a condições ambientais adversas, bem como ao ataque de patógenos, principalmente fungos do gênero *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Phytium* e *Macrophomina*. Para uma germinação e emergência mais rápidas em plantio mais cedo, deve-se optar por uma profundidade de plantio mais rasa, onde a temperatura do solo é mais favorável. Em plantios tardios, as temperaturas do solo são geralmente adequadas em qualquer profundidade, e a umidade do solo, nesse caso, é o fator limitante para rápido crescimento (Aldrich et al. 1982; Ritchie & Hanway, 1989; Magalhães et al., 2007).

Se a irrigação está disponível ou uma chuva recente aconteceu, não há com que se preocupar. No entanto, na falta dessas situações, as camadas mais profundas do solo possuem maior teor de umidade nos plantios tardios.

3.2 Estádio V₃

(Três folhas desenvolvidas, Figura 3) - O estágio de três folhas completamente desenvolvidas ocorre com, aproximadamente, duas semanas após o plantio. Neste estágio, o ponto de crescimento ainda se encontra abaixo da superfície do solo e a planta possui ainda pouco caule formado (Figura 4). Pêlos radiculares do sistema radicular nodal estão agora em crescimento e o desenvolvimento das raízes seminais é paralisado (Magalhães et al. 1994).

Foto: Adaptação sobre imagem de Ritchie & Hanway (1989).



Figura 3. Planta no estágio V3, mostrando o ponto de crescimento abaixo da superfície do solo.

Foto: Adaptação sobre imagem de Ritchie & Hanway (1989).



Figura 4. Planta no estágio de seis folhas completamente desenvolvidas.

Todas as folhas e espigas que a planta eventualmente irá produzir estão sendo formadas no V₃. Pode-se dizer, portanto, que o estabelecimento do número máximo de grãos ou a definição da produção potencial estão sendo definidos neste estágio. No estágio V₅ (cinco folhas completamente desenvolvidas), tanto a iniciação das folhas como das espigas vai estar completa e a iniciação do pendão já pode ser vista microscopicamente na extremidade de formação do caule, logo abaixo da superfície do solo (Magalhães et al. 1994) .

O ponto de crescimento, que se encontra abaixo da superfície do solo, é bastante afetado pela temperatura do solo nesses estádios iniciais do crescimento vegetativo. Assim, temperaturas baixas podem aumentar o tempo decorrente entre um estágio e outro, alongando assim o ciclo da cultura, podendo aumentar o número total de folhas, atrasar a formação do pendão e diminuir a disponibilidade de nutrientes para a planta. Uma chuva de granizo ou vento neste estágio vai ter muito pouco ou nenhum efeito na produção final de grãos. Disponibilidade de água neste estágio é fundamental. Por outro lado, o excesso de umidade ou encharcamento, quando o ponto de crescimento ainda se encontra abaixo da superfície do solo, pode matar a planta em poucos dias (Ritchie & Hanway, 1989, Aldrich et al. 1982).

Controle de plantas daninhas nesta fase é fundamental para reduzir competição por luz, água e nutrientes. Como o sistema radicular está em pleno desenvolvimento, mostrando considerável porcentagem de pêlos absorventes e ramificações diferenciadas, operações inadequadas de cultivo (profundas ou próximas a planta) poderão afetar a densidade e distribuição de raízes com conseqüente redução na produtividade. Portanto, é recomendada cautela no cultivo.

3.3 Estádio V₆

(Seis folhas desenvolvidas, Figura 5) - Neste estágio, o ponto de crescimento e pendão estão acima do nível do solo (Magalhães et al., 2007) (Figura 6), o colmo está iniciando um período de alongação acelerada. O sistema radicular nodal (fasciculado) está em pleno funcionamento e em crescimento.

Foto: Adaptação sobre imagem de Ritchie & Hanway (1989).



Figura 5. Planta no estágio V6 mostrando ponto de crescimento acima da superfície do solo.

Foto: Adaptação sobre a imagem de Ritchie & Hanway (1989).



Figura 6. estágio V9, mostrando detalhes de varias espigas pontenciais.

Neste estágio, pode ocorrer o aparecimento de eventuais perfilhos (ou até mesmo em estádios anteriores), os quais encontram-se diretamente ligados à base genética do cultivar, ao estado nutricional da planta, ao espaçamento adotado, ao ataque de pragas; ao estresse hídrico e às alterações bruscas de temperatura (baixa ou alta). No entanto, existem poucas evidências experimentais que demonstram a sua influência negativa ou positiva na produção (Magalhães et al. 1995; Magalhães et al., 2010).

No estágio V₈, inicia-se a queda das primeiras folhas e o número de fileiras de grãos é definido. Durante este estágio, constata-se a máxima tolerância ao excesso de chuvas. No entanto encharcamento por períodos de tempo maior que cinco dias poderão acarretar prejuízos consideráveis e irreversíveis (Alves et al., 2002).

Estresse hídrico nesta fase pode afetar o comprimento de internódios, provavelmente pela inibição da alongação das células em desenvolvimento, concorrendo desse modo para a diminuição da capacidade de armazenagem de açúcares no colmo. O déficit de água também vai resultar em colmos mais finos, plantas de menor porte e menor área foliar (Magalhães et al. 1998).

Evidências experimentais demonstram que a distribuição total das folhas expostas neste período, mediante ocorrência de granizo, geada, ataque severo de pragas e doenças, além de outros fatores, acarretarão quedas na produção da ordem de 10% a 25% (Fancelli & Dourado Neto, 2000).

Períodos secos aliados a conformação da planta, característica desta fase (conhecida como fase do "cartucho"), conferem à cultura do milho elevada suscetibilidade ao ataque da lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*), exigindo assim constante vigilância.

De V₆ até o estágio V₈ deverá ser aplicado à adubação nitrogenada em cobertura (Coelho & França, 1995).

3.4 Estádio V₉

Nesse estágio, muitas espigas são facilmente visíveis se for feita uma dissecação da planta (Figura 7). Todo nó da planta tem potencial para produzir uma espiga, exceto os últimos 6 a 8 nós abaixo do pendão. Assim, uma planta de milho teria potencial para produzir várias espigas; porém, apenas uma ou duas (caráter prolífico) espigas conseguem completar o crescimento.

Foto: Paulo Cesar Magalhães.



Figura 7. Estádio de pendoamento da Planta.

Neste estágio, ocorre alta taxa de desenvolvimento de órgãos florais. O pendão inicia um rápido desenvolvimento e o caule continua alongando. A alongação do caule ocorre através dos entrenós. Após o estágio V_{10} , o tempo de aparição entre um estágio foliar e outro vai encurtar, ocorrendo, geralmente, a cada 2 ou 3 dias (Ritchie & Hanway, 1989; Magalhães et al. 1994; Ritchie et al., 2003).

Próximo ao estágio V_{10} , a planta de milho inicia um rápido e contínuo crescimento com acumulação de nutrientes e peso seco, os quais continuarão até os estádios reprodutivos. Há uma grande demanda no suprimento de água e nutrientes para satisfazer as necessidades da planta (Magalhães & Jones, 1990a; Ritchie et al., 2003).

3.5 Estádio V_{12}

O número de óvulos (grãos em potencial) em cada espiga assim como o tamanho da espiga são definidos em V_{12} , quando ocorre perda de duas a quatro folhas basais. Pode-se considerar que nesta fase inicia-se o período mais crítico para a produção, o qual estende-se até a polinização.

O número de fileiras de grãos na espiga já foi estabelecido. No entanto, a determinação do número de grãos/fileira só será definido cerca de uma semana antes do florescimento, em torno do estágio V_{17} (Magalhães et al. 1994).

Em V_{12} a planta atinge cerca de 85% a 90% da área foliar, e se observa o início de desenvolvimento das raízes adventícias (“esporões”).

Devido ao número de óvulos e tamanho da espiga serem definidos nesta fase, a deficiência de umidade ou nutrientes pode reduzir seriamente o número potencial de sementes, assim como o tamanho das espigas a serem colhidas. O potencial desses dois fatores de produção está também relacionado com o período de tempo disponível para o estabelecimento deles, o qual corresponde ao período de V_{10} a V_{17} . Assim, genótipos precoces nesses estádios, geralmente, possuem um período mais curto de tempo e usualmente têm espigas menores que os genótipos tardios. Uma maneira de compensar essa desvantagem dos precoces seria aumentar a densidade de plantio (Ritchie & Hanway, 1989; Ritchie et al., 2003).

3.6 Estádio V_{15}

Este estágio representa a continuação do período mais importante e crucial para o desenvolvimento da planta, em termos de fixação do rendimento. Desse ponto em diante, um novo estágio foliar ocorre a cada 1 ou 2 dias. Estilos-estigmas iniciam o crescimento nas espigas.

Em torno do estágio V_{17} as espigas atingem um crescimento tal que suas extremidades já são visíveis no caule, assim como a extremidade do pendão já pode também ser observada (Magalhães et al. 1994).

Estresse de água ocorrendo no período de duas semanas antes até duas semanas após o florescimento vai causar grande redução na produção de grãos (Bergamaschi et al., 2004; Magalhães & Durães, 2008). Porém, a maior redução na produção poderá ocorrer com déficit hídrico na emissão dos estilo-estigmas (início de R_1). Isso é verdadeiro também para outros tipos de estresse como deficiência de nutrientes, alta temperatura ou granizo. O período de 4 semanas em torno do florescimento é o mais importante para irrigação (Magalhães et al. 1995; Resende et al., 2000).

3.7 Estádio V_{18}

É possível observar que os “cabelos” ou estilos-estigmas dos óvulos basais alongam-se primeiro em relação aos “cabelos” dos óvulos da extremidade da espiga. Raízes aéreas, oriundas dos nós acima do solo, estão em crescimento neste estágio. Estas raízes contribuem na sustentação da planta e na absorção de água e nutrientes (como o fósforo), além de ter um papel importantíssimo em situações de alagamento tendo a função de aeração (Lynch & Ho, 2005; Lynch, 2007; Vodnik et al., 2009).

Em V_{18} a planta do milho se encontra a uma semana do florescimento e o desenvolvimento da espiga continua em ritmo acelerado. O florescimento nada mais é do que uma consequência de uma transição da fase vegetativa para reprodutiva, a qual é resultante da ação de efeitos ambientais e sinais internos promovidos por genes (Castro, 2010). Alguns destes genes e suas posições no cromossomo vêm sendo reportados (Colasanti et al., 1998; Lima, 2006; Lima et al., 2008).

Estresse hídrico nesse período pode afetar mais o desenvolvimento do óvulo e espiga que o desenvolvimento do pendão. Com esse atraso no desenvolvimento da espiga, pode haver problemas na sincronia entre emissão de pólen e recepção pela espiga. Caso o estresse seja severo, ele pode atrasar a emissão do “cabelo” até a liberação do pólen terminar, ou seja, os óvulos que porventura emitir o “cabelo” após a emissão do pólen não serão fertilizados e, por conseguinte, não contribuirão para o rendimento (Magalhães et al. 1994; Magalhães et al. 1995; Magalhães et al. 1999).

Híbridos não prolíficos produzirão cada vez menos grãos com o aumento da exposição ao estresse. Porém, tendem a render mais que os prolíficos em condições não estressantes. Os prolíficos, por sua vez, tendem a apresentar rendimentos mais estáveis em condições variáveis de estresse, uma vez que o desenvolvimento da espiga é menos inibido pelo estresse (Thomison & Jordan 1995).

3.8 Estádio V_T , Pendoamento

Este estágio inicia-se quando o último ramo do pendão está completamente visível e os “cabelos” não tenham ainda emergido. A emissão da inflorescência masculina antecede de 2 a 4 dias a exposição dos estilo-estigmas, no entanto, 75% das espigas devem apresentar seus estilo-estigmas expostos, após o período de 10-12 dias posterior ao aparecimento do pendão. O tempo decorrente entre V_T e R_1 pode variar consideravelmente dependendo do híbrido e condições ambientais. A perda de sincronismo entre a emissão dos grãos de pólen e a receptividade dos estilo-estigmas da espiga concorre para o aumento da porcentagem de espigas sem grãos nas extremidades. Em condições de campo, a liberação do pólen geralmente ocorre nos finais das manhãs e início das noites. Neste estágio a planta atinge o máximo desenvolvimento e crescimento. Estresse hídrico e temperaturas elevadas (acima de 35 °C) podem reduzir drasticamente a produção. Um pendão de tamanho médio chega a ter 2,5 milhões de grãos de pólen, o que equivale dizer que a espiga em condições normais dificilmente deixará de ser polinizada pela falta de pólen, desde que o número de óvulos está em torno de 750 a 1000 (Magalhães et al. 1999; Fancelli & Dourado Neto, 2000; Ritchie et al., 2003).

A planta apresenta alta sensibilidade ao encharcamento nesta fase, o excesso de água pode contribuir inclusive com a inviabilidade dos grãos de pólen (Zaidi et al., 2004). A falta de água nesse período, além de afetar o sincronismo pendão-espiga (Edmeades et al., 2000), pode reduzir a chance de aparecimento de uma segunda espiga em materiais prolíficos.

Nos estádios de V_T a R_1 , a planta de milho é mais vulnerável às intempéries da natureza que qualquer outro período, devido ao pendão e todas as folhas estarem completamente expostas. Remoção de folha neste estágio, por certo, resultará em perdas na colheita (Magalhães et al. 1999; Fancelli & Dourado Neto, 2000). O período de liberação do pólen se estende por uma a duas semanas. Durante esse tempo, cada “cabelo” individual deve emergir e ser polinizado para resultar num grão.

3.9 Estádio R_1 , Embonecamento e Polinização

Esse estágio é iniciado quando os estilos-estigmas estão visíveis, para fora das espigas. A polinização ocorre quando o grão de pólen liberado é capturado por um dos estilo-estigmas. O grão de pólen, uma vez em contato com o “cabelo”, demora cerca de 24 horas para percorrer o tubo polínico e fertilizar o óvulo, geralmente o período requerido para todos os estilo-estigmas em uma espiga serem polinizados é de 2 a 3 dias. Os “cabelos” da espiga crescem cerca de 2,5 a 4,0 cm por dia e continuam a se alongar até serem fertilizados (Ritchie & Hanway, 1989; Ritchie et al., 2003).

O número de óvulos que será fertilizado é determinado neste estágio. Óvulos não fertilizados, evidentemente, não produzirão grãos. Estresse ambiental nesta fase, especialmente no hídrico, causa baixa polinização e baixa granação da espiga, uma vez que, sob seca, tanto os “cabelos” como os grãos de pólen tendem à dissecação (Bruce et al., 2002). Não se deve descuidar de insetos como a lagarta-da-espiga que se alimentam dos “cabelos”. Devem-se combater essas pragas, caso haja necessidade. A absorção de potássio nesta fase está completa, enquanto nitrogênio e fósforo continuam sendo absorvidos.

A liberação do grão de pólen pode iniciar ao amanhecer, estendendo-se até o meio-dia; no entanto, esse processo raramente exige mais de quatro horas para sua complementação. Ainda sob condições favoráveis, o grão de pólen pode permanecer viável por até 24 horas. Sua longevidade, entretanto, pode ser reduzida quando submetido a baixa umidade e altas temperaturas (Magalhães et al. 1994).

O estabelecimento do contato direto entre o grão de pólen e os pêlos viscosos do estigma estimula a germinação do primeiro, dando origem a uma estrutura denominada de tubo polínico, que é responsável pela fecundação do óvulo inserido na espiga. A fertilização ocorre de 12 a 36 horas após a polinização, período esse variável em função de alguns fatores envolvidos no processo, tais como teor de água, temperatura, ponto de contato e comprimento do estilo-estigma (Ritchie & Hanway, 1989; Magalhães et al. 1994; Fancelli & Dourado Neto, 2000). Assim, o número de óvulos fertilizados apresenta estreita correlação com o estado nutricional da planta, com a temperatura, bem como com a condição de umidade contida no solo e no ar. Evidencia-se, portanto, a decisiva influência do ambiente nessa etapa de desenvolvimento, recomendando-se criterioso planejamento da cultura, com referência principal à época de semeadura e à escolha da cultivar, de forma a garantir as condições climáticas favoráveis exigidas pela planta neste estágio.

A escolha do genótipo para uma determinada região, assim como a época de semeadura, deve ser fundamentada em fatores como finalidade da produção, disponibilidade de calor e água, ocorrência de veranicos durante o ciclo, bem como no nível tecnológico a ser adotado, entre outros (Fancelli & Dourado Neto, 2000).

3.10 Estádio R₂, Grão Bolha d'Água

Os grãos aqui se apresentam brancos na aparência externa e com aspectos de uma bolha d'água. O endosperma, portanto, está com uma coloração clara, assim como o seu conteúdo, que é basicamente um fluido cuja composição são açúcares. Embora o embrião esteja ainda desenvolvendo vagorosamente neste estágio, a radícula, o coleoptilo e a primeira folha embrionária já estão formados. Assim, dentro do embrião em desenvolvimento já se encontra uma planta de milho em miniatura. A espiga está próxima de atingir seu tamanho máximo. Os estilos-estigmas tendo completado sua função no florescimento, estão agora escurecidos e começando a secar (Ritchie & Hanway 1989; Ritchie et al., 2003).

A acumulação de amido se inicia neste estágio, com os grãos experimentando um período de rápida acumulação de matéria seca. Esse rápido desenvolvimento continuará até próximo ao estágio R₆. N e P continuam sendo absorvidos e a realocação desses nutrientes das partes vegetativas para espiga tem início neste estágio. A umidade de 85% nos grãos nessa fase começa a diminuir gradualmente até a colheita (Magalhães & Jones, 1990 a,b ; Magalhães et al. 1994).

3.11 Estádio R₃, Grão Leitoso

Esta fase é iniciada normalmente 12 a 15 dias após a polinização. O grão se apresenta com uma aparência amarela e, no seu interior, um fluido de cor leitosa, o qual representa o início da transformação dos açúcares em amido, contribuindo assim para o incremento de seu peso seco (Figura 8). Tal incremento ocorre devido à translocação dos fotoassimilados presentes nas folhas e no colmo para a espiga e grãos em formação. A eficiência dessa translocação, além de ser importante para a produção, é extremamente dependente de água (Magalhães & Jones, 1990b; Magalhães et al. 1998; Durães et al., 2002). Embora neste estágio o crescimento do embrião ainda seja considerado lento, ele já pode ser visto caso haja uma dissecação. Este estágio é conhecido como aquele em que ocorre a definição da densidade dos grãos (Magalhães et al. 1994; Fancelli & Dourado Neto, 2000).

Foto: Paulo Cesar Magalhães.



Figura 8. Estádio R1, estilo-estigmas captando grãos de polén.

Os grãos nesta fase apresentam rápida acumulação e matéria seca e com cerca de 80% de umidade, sendo que as divisões celulares dentro do endosperma apresentam-se essencialmente completas. O crescimento a partir daí é devido à expansão e enchimento das células do endosperma com amido.

O rendimento final depende do número de grãos em enchimento (desenvolvimento) e do tamanho final (período de enchimento) que eles alcançarão. Um estresse hídrico nesta fase, embora menos crítico que na fase anterior, pode afetar a produção (Bergamaschi et al, 2004). Com o processo de maturação dos grãos o potencial de redução na produção final de grãos devido ao estresse hídrico vai diminuindo. Embora neste período a planta deva apresentar considerável teor de sólidos solúveis prontamente disponíveis, objetivando a evolução do processo de formação de grãos, a fotossíntese mostra-se imprescindível. Em termos gerais, considera-se como importante caráter condicionador de produção a extensão da área foliar que permanece fisiologicamente ativa após a emergência da espiga. Períodos nublados (ou de reduzida intensidade luminosa) acarretarão nesta fase a redução da fotossíntese, aumento do nível de estresse da planta, implicando na possível redução da taxa de acúmulo de matéria seca do grão e, conseqüentemente, redução também na produção final de grãos, além de favorecer a incidência de doenças do colmo (Magalhães et al. 1998; Fancelli & Dourado Neto, 2000).

Para lavouras destinadas à produção de sementes, este período assume particular importância, pois tem início o desencadeamento dos processos de diferenciação do coleóptilo, da radícula e das folhas rudimentares. Ainda neste estágio evidencia-se a translocação efetiva de N e P para os grãos em formação (Magalhães & Jones, 1990a; Fancelli & Dourado Neto, 2000).

3.12 Estádio R₄, Grão Pastoso

Este estágio é alcançado com cerca de 20 a 25 dias após a emissão dos estilo-estígmata, os grãos continuam se desenvolvendo rapidamente, acumulando amido. O fluido interno dos grãos passa de um estado leitoso para uma consistência pastosa (Figura 9), e as estruturas embriônicas de dentro dos grãos encontram-se já totalmente diferenciadas. A deposição de amido é bastante acentuada, caracterizando desse modo um período exclusivamente destinado

ao ganho de peso por parte do grão. Em condições de campo, tal etapa do desenvolvimento é prontamente reconhecida, pois, quando os grãos presentes são submetidos à pressão imposta pelos dedos, mostram-se relativamente consistentes, embora ainda possam apresentar pequena quantidade de sólidos solúveis, cuja presença em abundância caracteriza o estágio R₃ (grão leitoso) (Magalhães et al. 1994).

Foto: Adaptada sobre imagem de Ritchie & Hanway (1989).

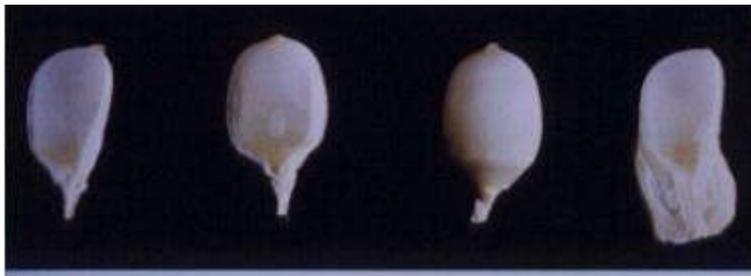


Figura 9. Grãos no estágio R₂, conhecido como bolha d`água.

Os grãos se encontram com cerca de 70% de umidade e já acumularam cerca da metade do peso que eles atingirão na maturidade. A ocorrência de adversidades climáticas, sobretudo falta de água, resultará numa maior porcentagem de grãos leves e pequenos o que comprometeria definitivamente a produção.

3.13 Estádio R₅, Formação de dente

Este período é caracterizado pelo aparecimento de uma concavidade na parte superior do grão, comumente designada de "dente", coincide normalmente com o 36º dia após o princípio da polinização. Nesta etapa, os grãos encontram-se em fase de transição do estado pastoso para o farináceo. A divisão desses estádios é feita pela chamada linha divisória do amido ou linha do leite. Essa linha aparece logo após formação do dente e com a maturação vem avançando em direção à base do grão. Devido à acumulação do amido, acima da linha é duro e abaixo é macio. Neste estágio, o embrião continua se desenvolvendo, sendo que, além do acentuado acréscimo de volume experimentado pelo endosperma, mediante o aumento do tamanho das células, observa-se também a completa diferenciação da radícula e das folhas embrionárias no interior dos grãos (Ritchie & Hanway, 1989; Magalhães et al. 1994; Fancelli & Dourado Neto, 2000; Ritchie et al., 2003).

Alguns genótipos do tipo "duro" não formam dente, daí este estágio nos referidos materiais é mais difícil de ser notado, podendo ser apenas relacionado ao aumento gradativo da dureza dos grãos.

Estresse ambiental nesta fase pode antecipar o aparecimento da formação da camada preta, indicadora da maturidade fisiológica. A redução na produção neste caso seria relacionada ao peso dos grãos e não ao número de grãos. Os grãos neste estágio apresentam-se com cerca de 55% de umidade (Magalhães et al. 1994).

Materiais destinados a silagem devem ser colhidos neste estágio, pois as plantas apresentam em torno de 33% a 37% de matéria seca. O milho colhido nesta fase apresenta as seguintes vantagens: apesar do decréscimo na produção de matéria verde, obtém-se significativo aumento na produção de

matéria seca por área; decréscimo nas perdas de armazenamento, pela diminuição do efluente, e aumento significativo no consumo voluntário da silagem produzida (Fancelli & Dourado Neto, 2000). Sementes colhidas neste estágio com 50% do endosperma sólido apresentam grande qualidade fisiológica (Faria et al., 2002).

3.14 Estádio R₆, Maturidade Fisiológica

Este é o estágio onde todos os grãos na espiga alcançam o máximo de acumulação de peso seco e vigor, e ocorre cerca de 50 a 60 dias após a polinização. A linha do amido já avançou até a espiga e a camada preta já foi formada. Essa camada preta ocorre progressivamente da ponta da espiga para a base (Figura 10). Neste estágio, além da paralisação total do acúmulo de matéria seca nos grãos, acontece também o início do processo de senescência natural das folhas das plantas, as quais gradativamente começam a perder a sua coloração verde característica (Ritchie & Hanway, 1989; Magalhães et al. 1994; Ritchie et al., 2003).

Foto: Paulo Cesar Magalhães.



Figura 10. estágio R3 ou grãos leitoso com umidade em torno de 80%.

O ponto de maturidade fisiológica caracteriza o momento ideal para a colheita, ou ponto de máxima produção, com 30-38% de umidade, podendo variar entre híbridos. No entanto, o grão não está ainda em condições de ser colhido e armazenado com segurança, uma vez que deveria estar com 13% a 15% de umidade para evitar problemas com a armazenagem. Com cerca de 18–25% de umidade a colheita já pode acontecer, desde que o produto colhido seja submetido a uma secagem artificial antes de ser armazenado.

A qualidade dos grãos produzidos pode ser avaliada pela percentagem de grãos ardidos, que interfere notadamente na destinação do milho em qualquer segmento da cadeia de consumo. A ocorrência de grãos ardidos está diretamente relacionada ao híbrido de milho e ao nível de empalhamento a que estão submetidas as suas espigas. Ainda de forma indireta, a presença de pragas, adubações desequilibradas e período chuvoso no final do ciclo, atraso na colheita e incidência de algumas doenças podem influir no incremento do número de grãos ardidos (Ritchie & Hanway, 1989; Magalhães et al. 1994; Fancelli & Dourado Neto, 2000; Ritchie et al., 2003).

A partir do momento da formação da camada preta, que nada mais é do que a obstrução dos vasos, rompe-se o elo da planta-mãe e o fruto, passando o mesmo a apresentar vida independente.

4. Grãos

A constituição morfológica das plantas e de seus frutos determina o potencial de produção da espécie. No milho, o interesse antropocêntrico reside principalmente na produção de grãos, para alimentação humana e animal.

O grão de milho é o fruto de uma semente, ou cariopse característico das gramíneas. O pericarpo (camada externa) é derivado da parede do ovário e pode ser incolor, vermelho, marrom ou variegado. A ponta do grão é a parte remanescente do tecido (pedicelo), que conecta o grão ao sabugo. Dentro do grão, estão o endosperma e o embrião.

O endosperma é triploide, originado-se da fusão de dois núcleos femininos e um núcleo masculino. Com exceção da sua camada mais externa, constituída por uma (ou raramente algumas) camada de células de aleurona, o endosperma é constituído principalmente de amido.

Os embriões dos cereais não armazenam reservas durante o desenvolvimento da semente, a não ser uma pequena quantidade de lipídios no escutelo. Observa-se, entretanto, que as reservas de carboidratos são polimerizadas no endosperma na forma de amido e as reservas de proteínas, acumuladas nos corpos proteicos distribuídos em todo o endosperma. Em milho, a formação desses materiais de reserva, durante o desenvolvimento das sementes, tem sido bem estudada. Sabe-se que o aumento da concentração de monossacarídeos nas regiões de trocas entre planta-mãe e cariopse aumentam a formação de tecidos de transferência substituindo a camada de aleurona. Esses tecidos de transferência são células com a membrana plasmática alongada, aumentando a superfície de contato sendo especializadas no transporte de nutrientes. Assim a chegada de açúcares no endosperma para a futura formação do amido é facilitada (Thompson et al., 2001; Barrero et al., 2009).

A concentração de açúcares atinge o máximo nesses tecidos um pouco antes do final da formação das células. O acúmulo de amido inicia-se à custa desses açúcares, alcançando o nível final em cerca de 46 dias. A proteína do endosperma aumenta durante o período de formação das células, mas representa uma segunda fase de acúmulo, em torno de 40 dias após a antese, que coincide com a deposição de proteína de reserva nos corpos proteicos. Há um decréscimo de RNA no endosperma durante o período de rápida síntese de amido e o RNA decresce no endosperma durante o período de secagem da semente (46 dias após a antese).

Estudos do sistema de incorporação de aminoácidos em proteínas têm mostrado que, inicialmente, o sistema mais ativo se encontra no endosperma em desenvolvimento, mas nos últimos estádios de formação da semente há diminuição dessa atividade no endosperma e o embrião torna-se o sistema mais ativo, quando se inicia a dessecação das sementes.

Uma vez fertilizado, não há segurança de que o grão crescerá normalmente, pois vários fatores poderão impedir um crescimento normal. A presença da camada preta na base do grão (sinal de maturidade fisiológica) mostra que ele foi fertilizado e é independente do seu estágio de crescimento (enchimento).

Os vários tipos de milho (duro, dentado, farináceo, doce, ceroso, pipoca, QPM-"Quality Protein Maize") diferem em seu conteúdo de açúcar, teor e qualidade de proteína e também no tipo, forma e concentração dos grãos de amido. A composição média de um grão de milho dentado (com base no peso da matéria seca) é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4. Composição média (%) de um grão de milho dentado, com base no peso da matéria seca.

Partes constituintes	Peso total	Amido	Proteína	Lipídio	Açúcar	Cinza
Endosperma	82,6	87,6	7,9	0,83	0,62	0,33
Embrião	11,1	8,0	18,3	33,5	10,5	10,6
Pericarpo	5,4	7,2	3,6	1,03	0,36	0,85
Ponta	0,8	5,3	9,1	3,8	1,61	1,59
Peso total do grão	100	73,5	9,0	4,3	1,9	1,5

Fonte: Glover e Mertz (1987).

5. Produtividade

O aumento da massa da planta por meio dos produtos da assimilação (*taxa de produção, TP, ou produtividade*) pode ser expresso em um aumento de matéria seca (m) por unidade de tempo (t, geralmente semanas ou dias) durante o período de produção: **$TP = dm/dt$** . O *rendimento da produção (Rp)* é, pois, o incremento acumulado de fitomassa, o qual é expresso por uma função integral. O rendimento da produção corresponde à diferença da massa orgânica seca no tempo inicial em relação ao tempo final, dentro do *período de assimilação (dt)*, em que *TP* é a *taxa de produção*.

O rendimento da produção é o resultado da capacidade de assimilação da planta, do período disponível para a assimilação e das influências favoráveis e prejudiciais dos fatores ambientais, como: CO₂, luz, temperatura, aparato foliar, nutrientes, status hídrico, pragas e doenças, etc.

No caso do milho, o rendimento de grãos é determinado basicamente pelo número de grãos por unidade de área e, em menor escala, pela massa individual dos grãos (Richards, 2000). 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 & Ritchie, 1985).

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 "status" fisiológico da cultura nesse período, determinarão as taxas de crescimento da mesma, o número potencial de grãos e, conseqüentemente, o potencial produtivo da planta (Andrade et al., 1993a; Andrade et al., 1993b; Otegui & Bonhomme, 1998).

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). Tais diferenças são explicadas pelo efeito diferenciado na partição de fitomassa e na duração do período crítico de determinação do número de grãos (Andrade et al., 1999). Uma maior relação entre número de grãos por planta e taxa de crescimento da planta no período crítico de determinação do número de grãos, e não uma maior taxa de crescimento nesse período, tem sido indicada como um dos fatores pelo qual os híbridos modernos são mais produtivos do que híbridos mais antigos (Echarte et al., 2000).

A produtividade depende do número de grãos polinizados e desenvolvidos, quantidade de fotoassimilados disponíveis (fonte-fotossíntese) e translocados (força do dreno). Com relação ao número de grãos, ele é variável dentro e entre cultivares. O número de grãos potencialmente capazes de se desenvolverem em uma espiga é influenciado por fatores ambientais. Há evidência de uma relação inversa entre número de filas de grãos por espiga e

número de grãos viáveis por fila (número de grãos por espiga permanece praticamente o mesmo). A espiga apresenta sempre um número par de fileiras e, quanto maior a tendência à prolificidade (maior número de espigas por planta), menor o número de grãos por espiga. Se uma planta tem só uma espiga, os grãos polinizados que não se desenvolveram serão encontrados na ponta da espiga.

Os primeiros dias após a fertilização constituem um período bastante crítico. Se proteínas ou açúcares estão limitantes devido à seca, deficiência nutricional, tempo muito nublado ou sombreamento oriundo de altas populações, os grãos na parte superior da espiga abortam e, apesar de fertilizados, não se desenvolvem. A maior sensibilidade à variação de luminosidade é verificada no início da fase reprodutiva, ou seja, no período correspondente aos primeiros 10 a 15 dias após o florescimento (Fancelli & Dourado Neto, 2000). Em plantas com duas espigas, a superior apresenta maior número de grãos desenvolvidos, devido ao fato de haver uma hierarquia e preferência na formação desses grãos. Numa planta com duas espigas, a diminuição da fotossíntese (com remoção de folhas, por exemplo) diminuirá o número de grãos da espiga inferior. Um grão polinizado pode não desenvolver-se (acumular matéria seca) ou seu desenvolvimento pode ser bloqueado a meio caminho, originando um grão pequeno. O aparecimento de grãos enrugados na porção superior da espiga pode ser devido a: deficiência severa de água, destruição das folhas ou deficiência nutricional. Em resumo, pode-se dizer que o potencial genético para produtividade pode ser diminuído em vários estádios de desenvolvimento.

A questão se o rendimento de grão de milho é limitado pelas características da planta relacionadas à oferta de nutrientes (*fonte*, por exemplo, nutrientes, água, radiação, etc.) ou à demanda (*dreno*) por assimilados, nutrientes, água, radiação, dentre outros fatores, está em discussão. Dependendo do ambiente, se a *fonte* (aparato fotossintético) ou o *dreno* (grãos, meristemas, órgãos/ tecidos em crescimento) pode limitar o rendimento de grão para variados graus isto depende da capacidade e desempenho da cultivar em estabelecerem-se no campo, do estágio de desenvolvimento da cultura e da intensidade dos fatores ambientais presentes. Genericamente, para condições favoráveis de manejo, milhos tropicais são mais *dreno* limitantes do que fonte limitantes, visando rendimento de grãos (Borrás et al., 2004).

6. O Rendimento de Grãos é determinado pelos componentes do rendimento

De modo geral, nestes últimos cinquenta anos, o melhoramento do milho pode ser atribuído a 50% devido ao melhoramento genético (rendimento de grãos) e 50% devido ao manejo (Duvick, 2005). O rendimento de grãos pode ser dividido dentre os componentes de plantas por hectare (p.ex., 50.000/ha), espigas por planta (EPP, p.ex., 1,1), grãos por espiga (GPE, p.ex., 440) e peso por grão (PPG, p.ex., 330 mg, ou 330×10^{-9} t).

$$\begin{aligned}
 &= [\text{Plantas/ha} \times \text{EPP} \times \text{GPE} \times \text{PPG}] && \text{[1]} \\
 &= [50.000 \times 1,1 \times 440] \times 330 \times 10^{-9} && \text{[1a]} \\
 &= [24.200.000] \text{ grãos/ha} \times 330 \times 10^{-9} \text{ toneladas por} && \\
 &\quad \text{grão} && \\
 &= 7,885 = 8,0 \text{ t/ha} &&
 \end{aligned}$$

A produção total de grãos por hectare é representada pelo termo entre colchetes (Equação 1); portanto, conforme os componentes observados, o rendimento de grão pode ser expresso pela Equação 1a.

Para uma menor densidade populacional de plantas de milho, outros componentes, como “índice de espiga” e/ou “número de grãos por espiga” e/ou “peso por grão” devem ser expressos diferentemente pelo genótipo e manejo, para resultar em rendimento similar (8,0 t/ha, como na Equação 1b) ou rendimento diferenciado (como, por exemplo, de 7,2 t/ha, **Eq. 1c**; 6,5 t/ha, **Eq. 1d**; 6,0 t/ha, **Eq. 1e**).

Visando aumentos de produtividade de grãos de milho, a questão de população final em relação à população inicial de plantas é de fundamental importância. Cultivares modernas de milho estão sendo melhoradas para respostas positivas a aumentos de densidades (Tokatlidis & Koutrobas, 2004; Sangoi et al., 2007). As recomendações técnicas quanto à escolha da cultivar devem ser observadas para o local, época do ano e tipo de manejo a aplicar na cultura, visando aumentos no rendimento de grãos (Figura 11).

Foto: Adaptado sobre imagem de Ritchie & Hanway (1989).



Figura 11. Grãos no estágio R4, pastoso.

7. Enchimento do Grão

Em média, o desenvolvimento do grão se completa cerca de 50 a 55 dias após a fertilização. Esse período pode variar entre cultivares e dentro de uma mesma cultivar; logicamente, os fatores ambientais também induzem pequenas variações. Há um interesse acentuado em desenvolver cultivares que tenham a capacidade de aumentar a fase linear da curva que corresponde ao período efetivo de enchimento do grão. A relação fonte-dreno da planta pode determinar a duração desse período, ou seja, a quantidade de fotoassimilados disponíveis (fonte) e a capacidade da espiga (dreno) em acomodar esses fotoassimilados. Portanto, os parâmetros limitantes responsáveis pelo crescimento dos grãos podem ser agrupados em: a) ritmo de enchimento; b) tempo de enchimento; c) capacidade do grão. A exportação de assimilados a partir das folhas (fonte) é controlada por diversos processos estruturais e bioquímicos interrelacionados, incluindo: taxa fotossintética, partição dos produtos iniciais da fotossíntese entre sacarose e amido, taxa de síntese de sacarose, demanda respiratória, compartimentação inter/intracelular da sacarose, transferência de sacarose entre os vários tipos de células e sua acumulação no interior do floema.

O descarregamento do floema ocorre através de diversas vias e mecanismos, em diferentes tipos de dreno. Em sistemas vegetativos (folhas e raízes) predomina uma via simplástica. Nesse caso, o movimento é promovido pelo metabolismo ou pela compartimentação dos assimilados.

Em drenos reprodutivos, a ausência de continuidade do simplasto entre os tecidos maternal e embriônico obriga o assimilado a entrar no apoplasto. Dependendo do tipo de dreno, a entrada subsequente para o interior do embrião pode ocorrer através de um carregador específico para a sacarose, ou um carregador para hexose, seguida da hidrólise da sacarose pela invertase. Existem diversos níveis de controle do processo de descarregamento,

incluindo metabolismo, compartimentação, células de transferência, ação hormonal e a influência da turgescência na liberação do assimilado pelo floema e sua recuperação pelas células do dreno (Thompson et al., 2001; Barrero et al., 2009).

Tem-se verificado que a alocação e a partição de assimilados entre as porções da planta de produtividade útil e de produtividade biológica, excluída a anterior, são flexíveis e estão sob controle genético. Alterações na partição obtidas pelo melhoramento genético têm levado a aumentos na produção. Os processos limitantes que determinam os limites superiores de produção devem incluir o descarregamento do floema e o metabolismo das células do dreno.

Grande importância têm merecido os aspectos relativos ao controle exercido por células e tecidos nos modelos de alocação dos assimilados durante o desenvolvimento da planta e dos determinantes da taxa de crescimento e da dimensão do dreno. Características estruturais de vários drenos têm sido determinadas, mas os mecanismos envolvidos ainda não foram totalmente esclarecidos. Além disso, as análises quantitativas do carbono, do nitrogênio e da economia de água através da planta estão constantemente fornecendo subsídios para a eventual modelagem do processo de suprimento e utilização de assimilados durante o desenvolvimento vegetal.

Algumas pesquisas têm sugerido que deveriam ser desenvolvidos milhos precoces para o florescimento e que permanecessem durante um período tão longo quanto possível para o enchimento de grãos. Tal sugestão é feita devido à forte associação que existe entre este caráter e a produção de grãos. Variabilidade genética para este caráter foi encontrada em inúmeros estudos.

Existe, ainda, uma forte associação entre a fase vegetativa e a fase de enchimento de grãos. Resultados experimentais apontam que híbridos tardios possuem um período de enchimento de grãos mais prolongado que o de híbridos precoces. Muitos dos genes que causam incremento no período de enchimento de grãos também incrementam a fase vegetativa, mas como esta associação não é absoluta, é possível a obtenção de materiais com fase vegetativa reduzida e período prolongado de enchimento de grãos.

8. Fotossíntese

Fotossíntese é o processo através do qual organismos vivos clorofilados convertem a energia da luz em energia química de moléculas orgânicas. O entendimento dos fluxos de CO_2 na fotossíntese tem permitido desvendar as três etapas básicas acopladas ao processo fotossintético. Os aspectos fotoquímicos, fotofísicos (de transferência eletrônica com a formação de ATP e NADPH) e bioquímicos da fixação de carbono em compostos da fotossíntese já foram elucidados; entretanto, os aspectos genéticos ainda não foram totalmente esclarecidos. Pesquisas estão sendo realizadas envolvendo dois processos biológicos básicos: a) a expressão da informação genética; b) a regulação da fotossíntese. A investigação da natureza genética da fotossíntese tem possibilitado o entendimento dos mecanismos moleculares da auto-organização e auto-reprodução dos cloroplastos, sua herança e variabilidade e a sua atividade funcional. A regulação da eficiência fotossintética através da genética é um importante meio de aumentar a produtividade das culturas, uma vez que esta é baixa, em torno de 1%, na sua maioria.

Altas produtividades têm sido proporcionadas pelo aumento da área foliar, alterações na relação fitomassa e órgãos reprodutivos e por outras alterações morfofisiológicas. O desenvolvimento de métodos para regulação da fotossíntese e aumento da sua eficiência na utilização da energia solar é o mais importante meio de obter altas produções. No entanto, a relação entre fotossíntese e produção é bastante complexa e, às vezes, contraditória (Long et al., 2006). Isto se deve ao fato de que diversos fatores podem estar envolvidos, entre os quais pode-se citar a abertura estomática e a condutância de CO_2 no interior das células do mesófilo, idade e localização das folhas, uso eficiente da radiação, deficiência hídrica e comportamentos diferentes em plantas, tipo de via para fixação do carbono (C_3 , C_4 ou intermediária), e concentração de nitrogênio nas folhas. Grande parte da matéria seca do milho (90%) provém da fixação de CO_2 , pelo processo da fotossíntese. O milho é uma planta de metabolismo C_4 , que apresenta alta eficiência na utilização de

luz e CO₂. Portanto, uma das causas da queda de produtividade do milho é a deficiência de luz em períodos críticos do desenvolvimento, como, por exemplo, enchimento de grãos.

Deve-se ressaltar, no entanto, que, apesar da eficiência das plantas C₄, existem duas características da planta de milho que diminuem o potencial de eficiência das folhas. A mais limitante é o hábito de crescimento, que proporciona um autosombreamento das folhas inferiores. A outra é a presença do pendão, o qual fica inativo logo após a fertilização, mas que chega a sombrear as plantas em até 19%, dependendo da cultivar.

Para se estabelecer uma cultura eficiente no campo, aproveitando ao máximo a energia radiante, atenção é requerida tanto na densidade de plantio quanto na própria distribuição de plantas sobre a superfície, a qual é afetada pelo genótipo envolvido (Sangoi et al., 2007). Materiais com menor área foliar por planta requerem mais plantas por hectare, enquanto que plantas mais baixas requerem fileiras mais estreitas que plantas mais altas, para uma eficiente interceptação da luz. Uma boa densidade populacional de planta (estande) representa um fator de rendimento, pois é a partir daí que se vai ter uma cultura com sucesso (Otegui & Andrade, 2000). O ideal é um plantio adequado para a obtenção de um estande final, na colheita, de 40 a 60 mil plantas/ha. Cultivares modernas estão disponíveis no mercado e respondem bem a densidades de 70 mil plantas/há (Sangoi et al., 2007).

De acordo com Dwyer et al. (1991), a modernização dos sistemas de produção de milho tenderão a aumentar a densidade de planta para maximizar rendimento de grão. Em um desses estudos, quatro híbridos, nomeados de mais velho para mais recente, de acordo com o ano de lançamento no mercado (de 1958 a 1989), foram cultivados nas densidades de 20 mil, 80 mil e 130 mil plantas/ha.

Os índices de área foliar (IAF) dos híbridos mais recentes tenderam a ser maiores do que dos híbridos mais velhos, em comparáveis densidades de plantas. As taxas fotossintéticas foliares diminuíram em todos os híbridos, de acordo com o aumento de densidades, mas o declínio ocorreu em mais baixos IAF nos híbridos velhos. Como resultado, a respeito dos mais altos IAF dos híbridos recentes, eles mostraram uma igual ou mais alta resposta fotossintética da folha para irradiância (RFI) em todas as densidades de planta. A mais alta RFI dos recentes híbridos foi correlacionada com as mais altas taxas de crescimento da cultura (TCC) e rendimentos de grãos. Esses resultados sugerem que aumentos na densidade ótima de planta para grão e aumentos no rendimento devem ser atribuídos, em parte, para mais alto RFI, a elevados IAF em recentes híbridos.

Um caráter fisiológico observado em muitos genótipos de milho dessa última década é o chamado "stay green". Esse caráter envolve a capacidade da planta em manter suas folhas verdes (escape ou atraso da senescência) até próximo da maturação fisiológica dos grãos. Alguns trabalhos mostram uma relação entre atraso na senescência foliar e maior tolerância a altas densidades de plantas (Tollenaar & Lee, 2002; Valentinuz & Tollenaar, 2004; Sangoi et al., 2007).

O conteúdo de CO₂ na atmosfera, 0,03% (300 ppm), é limitante; daí cresce a necessidade de as plantas de milho tornarem-se eficientes na fixação desse gás. O ponto de compensação do CO₂ é diferente para plantas C₃ e C₄. No milho (C₄), é de 5 a 10 ppm, enquanto que, no feijão (C₃), é de 30 a 70 ppm. Ressalta-se que ponto de compensação é a intensidade de luz na qual fotossíntese equilibra com a respiração (ganho líquido de CO₂ é igual a zero). Somente acima do ponto de compensação ocorre ganho de peso de matéria seca. As plantas C₃ são aquelas cujo primeiro composto estável formado na fotossíntese possui três átomos de carbono (3PGA, ácido fosfoglicérico). A enzima Rubisco (Ribulose 1,5 difosfato carboxilase/oxigenase) é a responsável pela fixação de CO₂ em compostos orgânicos em plantas C₃. Já as plantas C₄ são aquelas cujo primeiro produto estável formado na fotossíntese possui quatro átomos de carbono (OAA, ácido oxaloacético). Tanto C₃ quanto C₄ utilizam a rota C₃. O importante é que, nas plantas C₄, a rota C₃ é precedida por passos adicionais, no quais há uma fixação preliminar de CO₂ através da enzima PEP-case (fosfoenolpiruvato carboxilase). Essa enzima, responsável pela fixação do CO₂ em plantas C₄, é cerca de 100 vezes mais eficiente que a Rubisco.

Estudos com fixação do CO₂ em plantas tropicais (C₄) revelaram o propósito da rota C₄. Plantas tropicais devem evitar perda excessiva de água por transpiração, o que conseguem fechando os estômatos; porém, isto reduz o fluxo de CO₂ da atmosfera nas células das bainhas vasculares, causando uma diminuição na concentração de CO₂. Conseqüentemente, a atividade da enzima Rubisco fica prejudicada. No entanto, as reações da PEP-case no mesófilo foliar têm uma afinidade muito mais alta por CO₂ e, assim, fixa CO₂ mais eficientemente. Essa reação serve para fixar e concentrar CO₂ na forma de oxaloacetato. Outra razão que limita a eficiência das plantas C₃ com relação às de ciclo C₄ é a fotorrespiração, que usa o O₂ produzido e destina menos carbono aos produtos finais, aparentando ser um processo de desperdício. Fotorrespiração inibe a formação líquida de fitomassa por plantas C₃ em até 50%. Plantas de metabolismo C₃ perdem 20 a 25% do carbono fixado devido à fotorrespiração, enquanto que as plantas com fotossíntese C₄ não mostram liberação mensurável de CO₂ à luz (Sage, 2002; Von Caemmerer, 2003; Sage, 2004). Fotossíntese líquida das plantas C₄, como o milho, assume valores de 50 a 70 mg CO₂ dm⁻² de folha h⁻¹, enquanto as plantas C₃ fixam CO₂ a taxas muito mais baixas (15 a 35 mg CO₂ dm⁻² h⁻¹). Um aumento da concentração de CO₂ na atmosfera leva a modificações fisiológicas principalmente em plantas do tipo C₃. Nessas plantas com ambiente elevado de CO₂, ocorre uma diminuição da condutância estomática e elevação da fotossíntese devido a dois fatores: (1) a aceleração da carboxilação e (2) diminuição da função oxigenase da rubisco (fotorrespiração). Em plantas do tipo C₄ foram observados diminuição da condutância estomática, porém a fotossíntese também decresceu. Há relatos que plantas em estresse hídrico decrescem a perda de água sob atmosfera elevada de CO₂ diminuindo o estresse (Long et al., 2004, 2005).

Fotossíntese pode ser medida diretamente pela absorção de CO₂ (usando um analisador de trocas gasosas por infravermelho) ou a evolução de O₂ (usando um eletrodo de Clark ou eletrodo de oxigênio). Embora tais medidas sejam importantes, informações sobre performance fotossintética não podem ser facilmente obtidas apenas pelas medidas de trocas gasosas. Medidas da fluorescência da clorofila têm-se apresentado como uma importante técnica em estudos fisiológicos de ecologia de plantas. O rendimento da fluorescência da clorofila revela o nível de excitação da energia no sistema de pigmentos que dirige a fotossíntese e tem-se constituído em potente ferramenta de *screening* para tolerância de plantas de milho a condições adversas, principalmente sob estresse hídrico (seca e encharcamento), solo com deficiência de nitrogênio e fósforo e solo com excesso de alumínio (Durães et al., 2002; Sayed, 2003; Magalhães et al., 2009).

9. O milho e o excesso de água

O encharcamento ou alagamento intermitente (saturação hídrica temporária do solo) é um dos estresses abióticos de maior impacto na sobrevivência de plantas em muitas regiões do mundo. Além de fatores naturais, como excesso de precipitação, águas marginais de cursos de rios e má drenagem, existem fatores antrópicos que influenciam o aumento de áreas alagadas, como urbanização excessiva, criação de hidrelétricas, remoção de vegetação, construção de canais, rodovias e irrigação inadequada (Dat et al., 2004).

O encharcamento também limita a exploração agrônômica de minifundiários que possuem, em suas propriedades, áreas de várzea onde ocorrem inundações frequentes em períodos de chuva, devido ao nível freático pouco profundo. O desenvolvimento de pesquisas avançadas para culturas tolerantes ao encharcamento certamente é uma alternativa para o aumento da produção brasileira, sendo um "atrativo agrônômico" para os 28 milhões hectares de terras brasileiras encharcadas com grande potencial agrícola (Magalhães et al., 2008).

O milho é uma cultura sensível ao alagamento (Magalhães et al., 2008; Fries, 2006). Somente no sul da Ásia, 15% das plantações de milho são afetadas por encharcamento e, na Índia, o excesso de água é o segundo fator de estresse depois do déficit hídrico (Zaidi et al., 2004).

Solos com quantidades excessivas de água apresentam como característica problemas na aeração, o que leva à condição de baixa (hipoxia) ou nenhuma (anoxia) concentração de oxigênio (Alves, 2002; Zaidi et al., 2003). Sem oxigênio nas raízes, a respiração mitocondrial é bloqueada e a produção de

energia fica restrita à fermentação com um rendimento de 2 ATPs (Sairam et al. 2008). Além disso, a hipoxia diminui a condutividade hidráulica e afeta as aquaporinas, diminuindo a absorção de água e de nutrientes da raiz, além de diminuir a fotossíntese (Dell'amico et al. 2001; Tournaire-Roux et al. 2003; Souza et al., 2011).

Existem alguns trabalhos relacionados com a seleção de milho adaptado ao encharcamento. Zaidi et al. (2003 e 2004) procuraram genótipos de milho tolerantes ao encharcamento em várzeas indianas. Estudando, comparativamente, milho mexicano e indiano, estes autores constataram genótipos indianos bastante eficientes quanto à tolerância (CM-118 e CM-501), os quais tiveram boa germinação em ambientes anóxicos e suas plantas jovens apresentaram características como clorofila (a/b), peso seco da parte aérea, volume de raiz, transpiração, rendimento de grãos, intervalo entre a floração masculina e feminina (IFMF) e açúcares solúveis bastante superiores em relação às testemunhas. Também Zaidi et al. (2007), utilizando a seleção de linhagens elites de milho com favoráveis alelos para a tolerância ao encharcamento, conseguiram desenvolver híbridos com altos rendimentos e estáveis sob o excesso de água.

Silva et al. (2007), utilizando cruzamento de linhagens, observaram a herança da tolerância ao encharcamento do solo em milho avaliando características como peso seco da parte aérea e da raiz. Estudos semelhantes mostraram o desempenho de duas variedades venezuelanas frente ao excesso de água. Estas, comparadas com testemunhas, apresentaram maior desempenho quanto às características área foliar, massa seca, crescimento radicular, presença aerênquimas e raízes adventícias (Lizaso et al., 2001).

São poucos os materiais comerciais de milho adaptados a condições de encharcamento disponíveis no mercado. Entretanto, vale ressaltar uma variedade brasileira conhecida por milho "Saracura", cv. BRS 4154. O desenvolvimento desse material foi contínuo, tendo sido utilizado o método de seleção recorrente fenotípica estratificada modificada. Atualmente, esta variedade se encontra no 18º ciclo anual de seleção. Sua capacidade em tolerar períodos intermitentes de alagamento deve-se à presença de diferentes mecanismos bioquímicos e morfofisiológicos (Souza et al. 2009; Souza et al. 2010; Pereira et al. 2010; Souza et al. 2011). Com relação aos mecanismos de tolerância, destaca-se nesta variedade o aumento de câmaras na raiz (raiz com maior porosidade) chamadas de aerênquima ao longo dos ciclos de seleção (Figura 12). Os aerênquimas presentes em grandes quantidades nos últimos ciclos de seleção favorecem a aeração (Souza et al. 2009) e, conseqüentemente, maior absorção de água e nutrientes nas raízes e maior trocas gasosas foliares (como fotossíntese, transpiração e condutância estomática e carbono intercelular) (Figura 13). Ocorre uma forte relação entre essas câmaras e a produção (rendimento de grãos) no milho "Saracura" e o cálcio têm grande importância na tolerância do milho ao encharcamento (Melo et al., 2004; Ferrer et al., 2005; Souza et al., 2011).

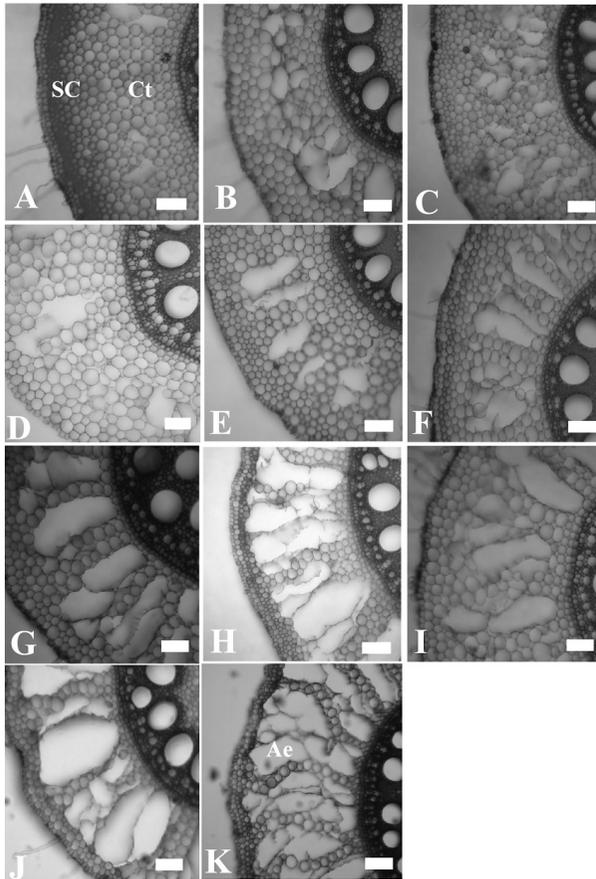


Figura 12. Fotomicrografias de secções transversais radiculares do milho 'Saracura' ao longo dos sucessivos ciclos de seleção (alternados) e da testemunha sob alagamento intermitente. Ct = cótex; a = aerênquimas; CS = camada de células suberizadas (Exoderme). A = BR 107; B = C1; C = C3; D = C5; E = C7, F = C9; G = C11; H = C13; I = C15; J = C17; K = C18. A barra corresponde a 100 µm. (Souza et al., 2009).

Fonte: Souza et al, (2009)

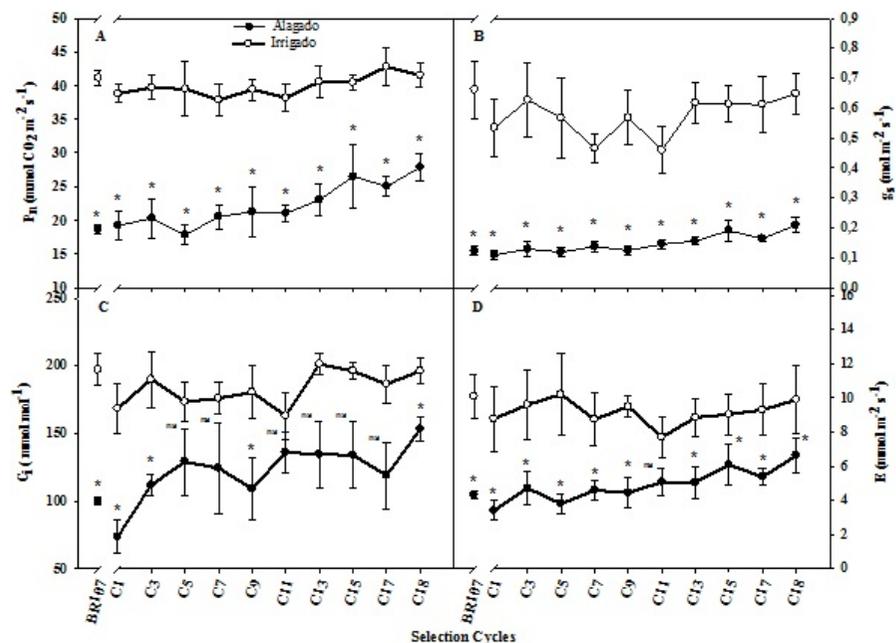


Figura 13. Características de trocas gasosas ao longo dos ciclos de seleção do milho 'Saracura' em duas condições hídricas. **A** taxa de fotossíntese foliar (P_n), **B** condutância estomática (g_s), **C** concentração intercelular de carbono (C_i), **D** taxa de transpiração (E). Asteriscos visualizados nos quadrantes da figura 13, (*) Indica significância a $P \leq 0.01$. (Souza et al., 2011)

Fonte: Souza et al. (2011)

10. O milho e a falta de água

A absorção, o transporte e a consequente transpiração de água pelas plantas são consequência da demanda evaporativa da atmosfera (evapotranspiração potencial), resistência estomática e difusão de vapor, água disponível no solo e densidade de raízes (Klar, 1984; Pimentel, 2004).

A planta absorve água do solo para atender às suas necessidades fisiológicas e, com isto, suprir a sua necessidade em nutrientes, que são transportados junto com a água sob a forma de fluxo de massa. Do total de água absorvida pela planta, uma quantidade bem reduzida (cerca de 1%) é retida pela mesma. Embora possa-se pensar que há desperdício, na verdade isso não ocorre, pois é pelo processo da transpiração (perda de calor latente) que os vegetais controlam a sua temperatura (Klar, 1984; Magalhães et al. 1995).

As restrições causadas pela baixa disponibilidade de água do solo (seca) ou pela alta demanda evaporativa acionam certos mecanismos fisiológicos que permitem aos vegetais escapar ou tolerar essas limitações climáticas, modificando seu crescimento e desenvolvimento, e até mesmo atenuando as reduções na produção final.

Dentre os mecanismos que podem contribuir para a resistência à seca, e que têm sido considerados em programas de melhoramento genético, apontam-se: a) sistema radicular extenso e profundo ou maior relação raiz/parte aérea; b) pequeno tamanho de células; c) cutícula foliar (com maior espessura e cerosidade); d) mudanças no ângulo foliar; e) comportamento e frequência estomática; f) fluorescência da clorofila *a*; g) acúmulo de metabólito intermediário; h) ajuste osmótico (resistência e proteção à desidratação das células); i) modificações anatômicas; j) teor de clorofilas e carotenóides (Magalhães et al. 1995; Durães et al., 2005; Cruz, 2006; Xu et al., 2008; Hund et al., 2009; Zhu et al., 2010).

O milho é cultivado em regiões cuja precipitação varia de 300 mm a 5.000 mm anuais, sendo que a quantidade de água consumida por uma planta de milho durante o seu ciclo está em torno de 600 mm (Aldrich et al. 1982). Dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20%, quatro a oito dias diminuem 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 vai resultar na menor produção de carboidratos, o que implicaria menor volume de matéria seca nos grãos (Bergamaschi et al., 2004; Magalhães & Durães, 2008). Contudo, a importância da água está relacionada também com a fotossíntese, uma vez que o efeito do déficit hídrico sobre o crescimento das plantas implica menor disponibilidade de CO₂ para assimilação (fechamento dos estômatos), diminuição de atividades de enzimas da fotossíntese e limitação dos processos de alongação celular (Klar, 1984; Foyer et al., 1998; Carmo-Silva et al., 2010).

A falta de água no milho é sempre acompanhada por interferência nos processos de síntese de RNA e proteína, caracterizada por um aumento aparente na quantidade de aminoácidos livres como a prolina (Ferreira et al., 2002). A manutenção da pressão de turgescência celular através do acúmulo de solutos (ajustamento osmótico) é um mecanismo de adaptação das plantas para seu crescimento ou sobrevivência em períodos de estresse de água (Serraj & Sinclair, 2002). Contudo para milho há trabalhos mostrando que a concentração de prolina nem sempre se correlaciona com o rendimento de grãos (Bolanos & Edmeades, 1991) e outros mostrando que eles se correlacionam (Chimenti et al., 2006).

Alguns genótipos de milho vêm mostrando modificações morfoanatômicas radiculares e foliares importantes para a tolerância a falta de água. Na folha podemos destacar a importância das células epidérmicas chamadas de buliformes. Essas células possuem um papel motor na folha, ou seja, no movimento de enrolamento foliar. Esse movimento do milho de enrolar suas folhas favorece um microclima e diminui a superfície de transpiração levando a uma perda menor de água. Uma maior quantidade de células buliformes e o maior tamanho dessas células promovem uma maior abertura da lâmina foliar expondo uma maior área da folha, portanto genótipos de milho com potenciais para a utilização no melhoramento para a seca apresentam folhas mais enroladas devido a células buliformes menores e em menor quantidade. Existem genótipos que naturalmente possuem suas folhas enroladas (Entringer, 2011). Na figura 14 e 15 podemos observar um genótipo com lâmina foliar enrolada e outro com lâmina foliar normal e suas respectivas células buliformes.

Na raiz, podemos destacar um aumento da espessura da camada de células suberizadas presentes na região da hipoderme (exoderme) e também do aumento de outra camada de células suberizadas chamada endoderme. Essas camadas possuem várias funções nas raízes de plantas, mas, no geral, são camadas de células especializadas em selecionar ou impedir algo (por exemplo, substância tóxica, microrganismos e outros) de entrar no córtex (exoderme) ou de entrar no cilindro vascular (endoderme). No caso do estresse hídrico, essas duas camadas impedem, na verdade, a saída de água dos feixes de xilema para o solo evitando a desidratação. Milho tolerante também possui xilema com diâmetro menor; assim diminui a chance de ocorrer embolismo e cavitação nos vasos devido à falta de água. Recentemente, também foi observado que, quanto maior a tolerância a seca no milho, maior a quantidade de aerênquimas. Com a presença de aerênquimas decresce o custo metabólico, devido à diminuição da presença de células em respiração já que essas câmaras nada mais são do que espaços de células mortas (Enstone et al., 2003; Pena-Valdivia et al., 2005; Zhu et al., 2010).

Com relação à capacidade da raiz de milho em chegar a camadas mais profundas do solo em busca de água, vêm se desenvolvendo pesquisas para quantificar melhor esta característica, pois nem sempre são fáceis de realizar. A abertura de trincheiras, por exemplo, com objetivo de caracterizar a morfologia radicular é bem complicada devido ao tempo gasto para abri-la e mão de obra. Recentemente, uma metodologia chamada "Shovelomics", em que são feitas medidas do ângulo de inserção das raízes no colo, vem trazendo bons resultados para a fenotipagem do milho para a seca. Genótipos tolerantes possuem ângulos de inserções menores caracterizando raízes mais profundas (Trachsel et al., 2011).

Apesar do alto requerimento de água pela planta de milho, ela é eficiente no seu uso para conversão de matéria seca. Por isso, a importância, em estudos de discriminação de genótipos de milho para tolerância ao estresse hídrico, verificar eficiência do uso da água. O aumento desta eficiência do uso da água (incorporação de carbono com um gasto menor de água) identifica genótipos tolerantes e pode ser calculado tanto a nível foliar (através de parâmetros de trocas gasosas) quanto no nível de dossel (Aldrich et al. 1982; Soler et al., 2007; Vitale et al., 2007; Hund et al., 2009; Magalhães et al., 2009).

Com relação a perda de água pelos estômatos, o fitohormônio ABA (ácido abscísico) é de grande importância. Sob baixa disponibilidade hídrica, há um grande acúmulo de ABA regulando a abertura e o fechamento dos estômatos. Por isso, seu acúmulo em folhas estressadas exerce um grande papel na redução da perda de água pela transpiração (Zhu, 2002). O ABA controla muitos processos importantes no crescimento e desenvolvimento da planta (Tardieu et al., 2010). Além de amplas funções no desenvolvimento e crescimento, ele também regula respostas adaptativas em várias condições adversas além da seca. O fechamento estomático também pode ser causado pelo aumento do transporte de ABA (através do xilema), produzido nas raízes, em contato com o solo seco, para a parte aérea (Schachtman & Goodger, 2008). Para verificar o teor de ABA na seiva do xilema em milho, lança-se mão de técnicas específicas para sua extração e análise (Goodger et al., 2005; Alvarez et al., 2008).

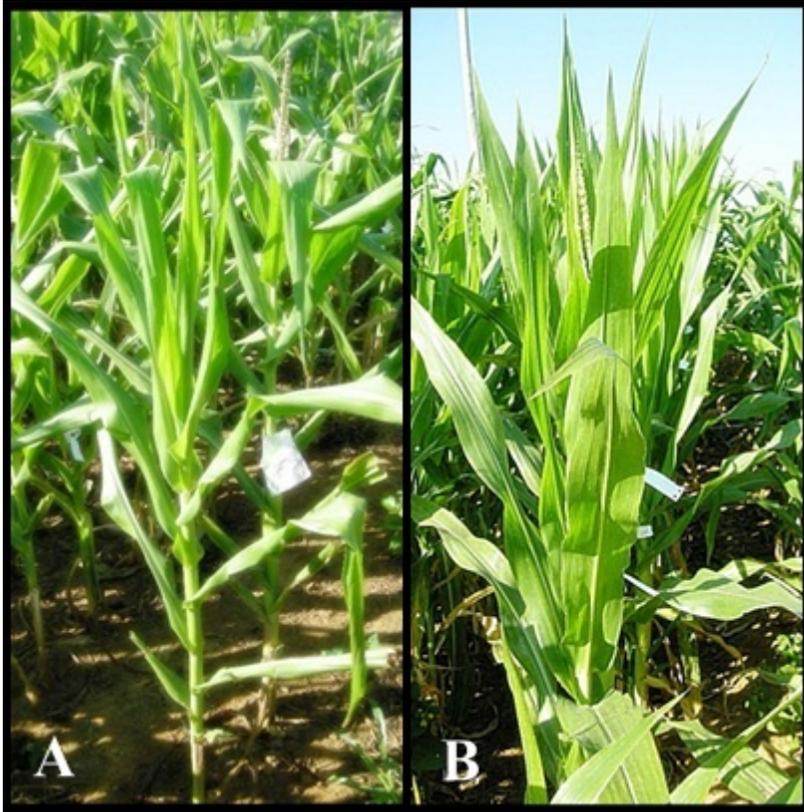


Figura 14. Linhagem com limbo foliar enrolado (A); Linhagem com o limbo foliar normal (B). (Entringer, 2011).
Fonte: Entringer, (2011)

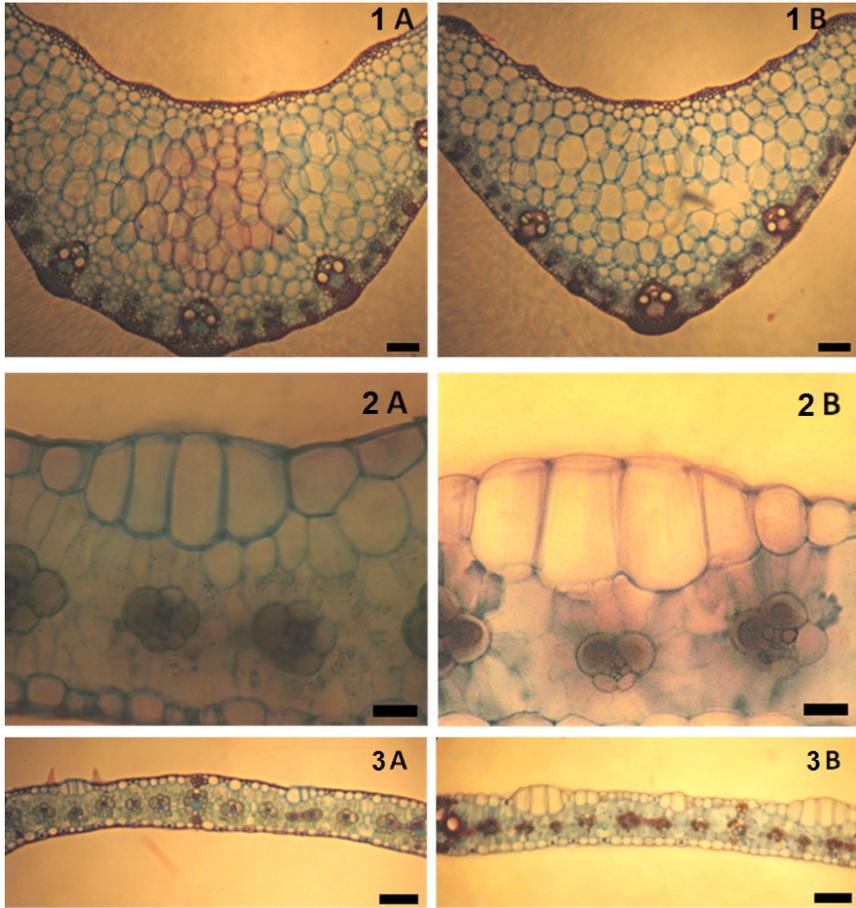


Figura 15. Seções transversais da nervura central (1A e 1B) barra = 100 μ m, mesofilo (2A e 2B) barra = 30 μ m e região da lâmina foliar (3A e 3B) barra = 100 μ m, de duas linhagens de milho, sendo (A), com o limbo foliar enrolado, e (B) com o limbo foliar normal. Fonte: (Entringer, 2011).

Fonte: Entringer, (2011).

Autores deste tópico: Paulo Cesar Magalhaes, Thiago Corrêa de Souza

Expediente

Embrapa Milho e Sorgo

Comitê de publicações

Sidney Netto Parentoni
[Presidente](#)

Elena Charlotte Landau
[Secretário executivo](#)

Flávia Cristina dos Santos
Guilherme Ferreira Viana
Eliane Aparecida Gomes
Flávio Tardin
Paulo Afonso Viana
Rosângela Lacerda de Castro
[Membros](#)

Corpo editorial

Israel Alexandre Pereira Filho
[Editor\(es\) técnico\(s\)](#)

Antonio Claudio da Silva Barros
Guilherme Ferreira Viana
[Revisor\(es\) de texto](#)

Rosângela Lacerda de Castro
[Normalização bibliográfica](#)

Enilda Alves Coelho
Arnaldo Macedo Pontes
[Editoração eletrônica](#)

Embrapa Informação Tecnológica

Selma Lúcia Lira Beltrão
Rúbia Maria Pereira
[Coordenação editorial](#)

Corpo técnico

Cláudia Brandão Mattos (Auditora)
Karla Ignês Corvino Silva (Analista de Sistemas)
Talita Ferreira (Analista de Sistemas)
[Supervisão editorial](#)

Cláudia Brandão Mattos
Mateus Albuquerque Rocha (SEA Tecnologia)
[Projeto gráfico](#)

Embrapa Informática Agropecuária

Kleber Xavier Sampaio de Souza
Sílvia Maria Fonseca Silveira Massruha
[Coordenação técnica](#)

Corpo técnico

Leandro Henrique Mendonça de Oliveira (Suporte operacional)
[Publicação eletrônica](#)

Dácio Miranda Ferreira (Infraestrutura de servidor)
[Suporte computacional](#)