

Limitações fisiológicas do milho nas condições de plantio nas regiões tropicais baixas.

Frederico O. M. Durães, Embrapa Milho e Sorgo (<http://www.cnpms.embrapa.br>),
Sete Lagoas, MG (Contactos: fduraes@cnpms.embrapa.br)

1. Introdução

O milho é uma espécie que tem mostrado variabilidade genética para responder às pressões de seleção para os mais variados caracteres e nas mais variadas condições ambientais. São também reconhecidas as dificuldades em se selecionar para estresses com base em parâmetros fenotípicos e genotípicos, morfo-fisiológicos, bioquímicos, e moleculares, e, em condições de campo; porém, esforços técnico-científicos e metodológicos estão sendo feitos para se conseguir superar estas limitações.

Genótipos de milho melhor adaptados e com mais alto rendimento poderiam ser mais eficientes e efetivos se atributos que conferem rendimento sob condições ambientais subótimas (limitantes por fatores abióticos: radiação e temperatura, água, nutrientes; e, bióticos: doenças, pragas e matocompetição) pudessem ser identificados e usados como critério de seleção. Poucos exemplos podem ser demonstrados, devido à dificuldade de se entender o que causa baixos rendimentos de grãos, e como características putativas, p.ex., aumentam a tolerância à seca e contribuem para o rendimento de grãos em ambientes limitantes em água.

A ampla variabilidade genética existente no milho tem favorecido o desenvolvimento de genótipos adaptados às mais diversificadas condições ambientais, necessitando-se assim, identificar e selecionar quais genótipos tem maior potencial e menos risco de exploração para os sistemas agrícolas, com adequadas práticas de manejo e em locais distintos.

Regiões tropicais baixas abrigam amplas áreas do território brasileiro, e genericamente, são descritas como de baixa altitude, com estratos de 0 até 700 m acima do nível do mar. Nestas regiões, radiação solar, temperatura e umidade constituem-se dentre os fatores de maior limitação ao desenvolvimento e respostas de milho.

2. A planta e a plantação de milho

O milho (*Zea mays* L.) apresenta características fisiológicas favoráveis à eficiência de conversão do carbono mineral em compostos orgânicos (Williams et al. 1965; Gifford & Evans, 1981). A planta de milho é considerada um sistema eficiente para converter a energia luminosa em matéria seca do grão, se bem que esse enfoque de incremento do rendimento do grão, pode estar negligenciando outras partes da planta economicamente importantes. O genótipo influencia a quantidade de energia fixada, bem como sua distribuição para as várias partes da planta. O rendimento de grão em uma dada área de terreno é considerado em seus componentes número de grãos por unidade de área x tamanho (e peso) de grão. A melhoria da eficiência do rendimento de grãos de milho pode ser observada no esquemático apresentado na **Figura 1**.

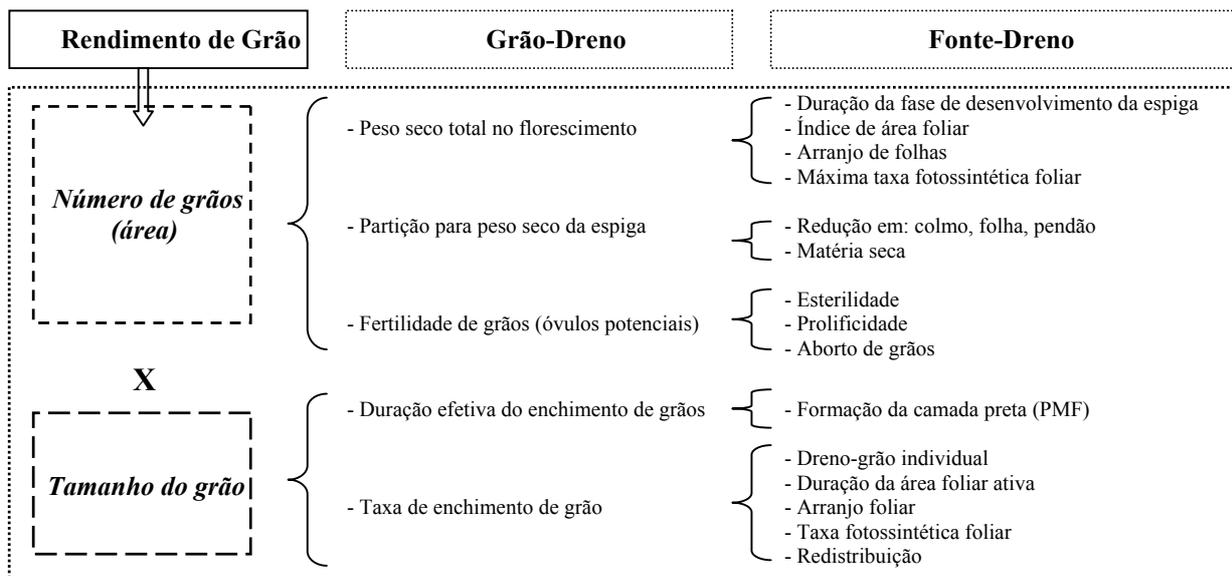


Figura 1. Esquemático de melhoria da eficiência do rendimento de milho.

Alguns processos fisiológicos são envolvidos para determinar esses componentes, e devem ser explorados para mudanças genéticas, visando melhoria do rendimento (**Figura 2**).

DECRÉSCIMO NA PRODUÇÃO

medido como um decréscimo na

- . Taxa de crescimento absoluto (*para plantas individuais*) e
- . Taxa de crescimento da cultura (*para grupos de plantas*)

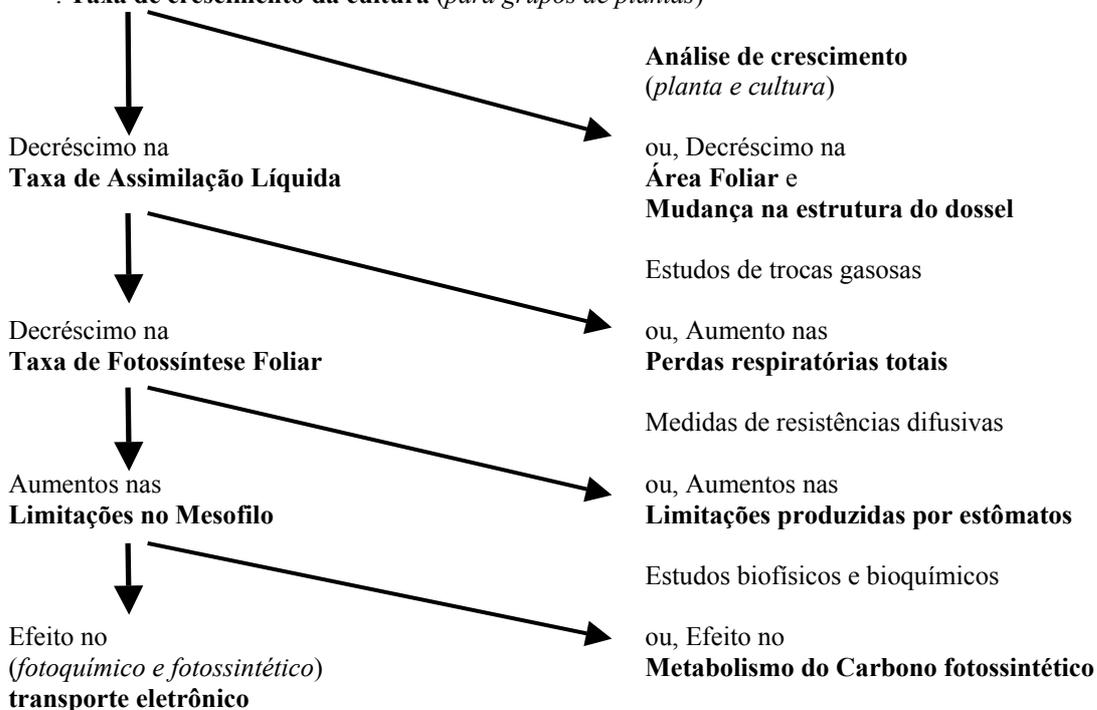


Figura 2. Esquemático da análise de fatores limitantes da produtividade de planta/cultura.

O número de óvulos presentes na época do florescimento representa o número de grãos potenciais que, entretanto, podem ser reduzidos por eventos posteriores ao florescimento (Derieux et al., 1983). Segundo Fuchs (1968), citado por Derieux et al. (1983), existe uma relação entre o número de óvulos e precocidade. Os resultados indicam que número de óvulos inicial é altamente correlacionado com a superfície foliar no início da diferenciação e que genótipo influenciou mais que o fator ambiental temperatura.

Segundo Evans (1975) o período de fertilização até rápido acúmulo de matéria seca no grão (*lag phase*), pode variar de 12 para 20 dias em cultivares de milho tropical, em contraste com cereais de grãos pequenos, tais como trigo, que tem uma *lag phase* de menos de sete dias.

Grãos que abortam são normalmente os mais jovens, no topo do sabugo da espiga, devido ao rápido acúmulo de matéria seca pelos grãos mais velhos abaixo no sabugo. Aborto ocorre a despeito da relativamente alta concentração de açúcares solúveis em colmos e grãos.

Milho tem potencial morfológico para produzir mais de uma espiga, e os mecanismos que controlam prolificidade são provavelmente relacionados com aqueles envolvidos em esterilidade. Evidências experimentais apontam que aborto de espiga está relacionado com competição intraplanta por fotoassimilados, durante o período crítico de crescimento.

Diferenças de rendimento de milho podem refletir o nível de práticas agrônômicas nas diferentes regiões. Problemas de fertilidade do solo, doenças de plantas, insetos, plantas daninhas, disponibilidade de umidade, e uma tendência para os extremos no clima em áreas tropicais; além de cultivos de subsistência, em condições precárias ou em associação com outros cultivos, podem explicar a variação nos rendimentos, em geral baixos.

Aumentos no rendimento podem ocorrer devido à melhor administração agro-econômica dos cultivos; entretanto, em patamares de produtividade mais elevados, os incrementos no rendimento devem passar pelo melhoramento genético, objetivando produtividade e/ou tolerância aos estresses.

Em áreas tropicais, a maioria dos altos rendimentos são restritos em áreas intermediárias ou de alta altitude, tendo longas estações chuvosas. Segundo Fisher & Palmer (1983), citando vários autores, rendimentos de 12 t.ha⁻¹ tem sido obtidos em latitude 18° S, altitude 1.500m. Em terras baixas tropicais, rendimentos podem atingir 5 a 8 t.ha⁻¹, com boa administração. Em regiões temperadas, rendimentos máximos próximo de 20 t.ha⁻¹ são relatados. Rendimentos comerciais de 10 t.ha⁻¹ são comuns (Frey, 1971).

Goldsworthy et al. (1974) apontam que produção de fitomassa total em ambientes tropicais não é um fator limitante para o rendimento de milho. Yamaguchi (1974) e Goldsworthy et al. (1974) atribuíram o baixo rendimento de grãos, em regiões tropicais, à deficiente partição da matéria seca para o grão.

Em áreas tropicais abaixo de 1.000 m de altitude, a planta de milho acumula considerável matéria seca no colmo, bainhas de folhas, sabugo e brácteas após florescimento. Parte dessa matéria seca é translocada para o grão mais tarde, no período de enchimento de grãos (Palmer et al., 1973). Resultados experimentais relatados por Goldsworthy et al. (1974) apontam que o rendimento de milho é limitado principalmente pelo tamanho do grão-dreno, embora sob algumas perdas ambientais de área foliar (fonte) próximo da maturidade pode reduzir o rendimento de grãos. Milhos tropicais geralmente

tem maturação tardia, porte alto e grande pendão. Eles mostram um nível maior de dominância apical, baixo índice de colheita, e, são menos eficientes em retranslocar para os grãos a matéria seca previamente depositada no colmo. Tais características têm provável importância para a adaptação do milho em ambientes tropicais, em competição vantajosa com plantas de rápido crescimento, e minimizado efeito da perda de folhas por insetos. Ou seja, milho tropical tem abundância de folha (fonte) e possivelmente tem mais problemas de partição e dreno (grão) do que milhos temperados. Reservas de açúcares no colmo pode ser, evolutivamente, resultado da tolerância a seca e pode ser associada com resistência para podridões do colmo.

Em altitudes superiores a 1.000m, os cultivares de milho tropical apresentam a duração do crescimento mais longa que em terras baixas tropicais e é limitado ou por baixas temperaturas ou disponibilidade de umidade para plantio (Wilson et al., 1973).

Embora os rendimentos em terras altas tropicais sejam maiores que aqueles em terras baixas tropicais, Goldsworthy & Colegrove (1974) e Yamaguchi (1974) concluíram que rendimentos em ambas as áreas foram limitadas pela capacidade do grão-dreno em acumular fotoassimilados.

Algumas dessas diferenças em partição são devidas ao ambiente e interação genótipo x ambiente. Entretanto, há consideráveis variações genéticas quando diferentes genótipos crescem em um mesmo ambiente. Por causa da sensibilidade ao fotoperíodo de genótipos tropicais, especialmente para faixas de latitudes superiores a 33° Sul, uma comparação não pode ser feita em ambientes temperados.

Segundo Badu-Apraku et al. (1983), uma redução no rendimento está associada com o período de enchimento de grãos mais curto. Durante um rápido enchimento de grãos, o aumento na matéria seca do grão resulta da utilização dos efeitos combinados de assimilados temporariamente estocados em partes vegetativas da planta e produzidos através da fotossíntese. Em altos regimes de temperatura diurna/noturna a acumulação de matéria seca durante o enchimento de grãos é reduzida. Rendimentos de grãos por planta também é menor sob altas temperaturas.

Diferenças no rendimento de grãos não são sempre causadas por diferenças na duração do cultivo, medidas em dias ou em acumulação de unidades de calor. Nas regiões tropicais, onde é menor a variação de temperatura, umidade é fator preponderante. A produção é influenciada pela disponibilidade de água no solo, especialmente na fase que antecede ao pendoamento (Mundstock, 1970).

2.1. Produção de milho para altas performances e rendimento de grãos

O rendimento de grãos de milho é determinado basicamente pelo número de grãos por unidade de área e, em menor escala, pela massa individual do grãos (Richards, 2000). Vide também **Figura 1**, que mostra esquemático de melhoria da eficiência do rendimento de milho.

A melhoria do rendimento em milho tem sido associada com o aumento na tolerância a estresses (Duvick, 1992, 1997; Tollenaar & Wu, 1999, Tollenaar et al., 2001) e o aumento na tolerância a estresses podem resultar, em parte, da seleção para aumento da estabilidade do rendimento (Durães et al., 2002).

2.2. Produção de milho sob condições ambientais sub-ótimas (estresses abióticos e bióticos)

Os rendimentos de grãos e outras variáveis de interesse para a caracterização da performance adaptativa dos genótipos de milho de diferentes grupos de maturidade (normal, precoce e superprecoce), cultivados em diferentes locais das regiões Centro e Sul do Brasil, são apresentados na **Tabela 1**, por Durães et al. (2002); e, os dados permitem observar variações significativas no rendimento de grãos, quando os ensaios foram separados por grupos de altitude (≥ 700 e < 700 m), visualizados também nas **Figuras 3 e 4**. No geral, os maiores rendimentos foram obtidos na região Sul, e em genótipos de grupos de maturidade tendendo de precoce a superprecoce. Na região Centro, as maiores produtividades foram obtidas pelos genótipos de grupo de maturidade precoce. Em ambas as regiões observaram-se os maiores rendimentos em ensaios conduzidos em locais de altitudes ≥ 700 m, sendo que na região Sul foram apresentadas as maiores instabilidades de rendimento em relação à região Centro, para genótipos de milho dos três grupos de maturidade.

Tabela 1. Rendimento de Grãos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de Cultivares de Milho em Regiões do Brasil (Média por Grupo de Maturidade e Altitude). Modificado de Durães et al. (2002).

| Região (BR) | Altitude (m) | Grupo de Maturidade | | |
|-------------|-----------------------------|---|-----------------------|-----------------------|
| | | Normal | Precoce | Superprecoce |
| | | ----- ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) ¹ ----- | | |
| Centro | ≥ 700 | 6286 a | 6535 a | 5615 a |
| | < 700 | 5848 b | 5998 b | 5748 a |
| | Diferença (2 a 8%) | 438 (↓, -7%) | 537 (↓, -8%) | 133 (↑, +2%) |
| Sul | ≥ 700 | 7813 a | 8144 a | 8192 a |
| | < 700 | 5325 b | 6681 b | 6602 b |
| | Diferença (18 a 32%) | 2488 (↓, -32%) | 1463 (↓, -18%) | 1590 (↓, -19%) |

¹médias seguidas da mesma letra, por espécie, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

Setas indicam redução (↓, %) ou aumento (↑, %) de rendimento, em função da altitude (m).

Fonte: Ensaios Nacionais de Cultivares de Milho (Normal, Precoce e Superprecoce), 2000-2001. **In:** Embrapa Milho e Sorgo (2002a, b, c).

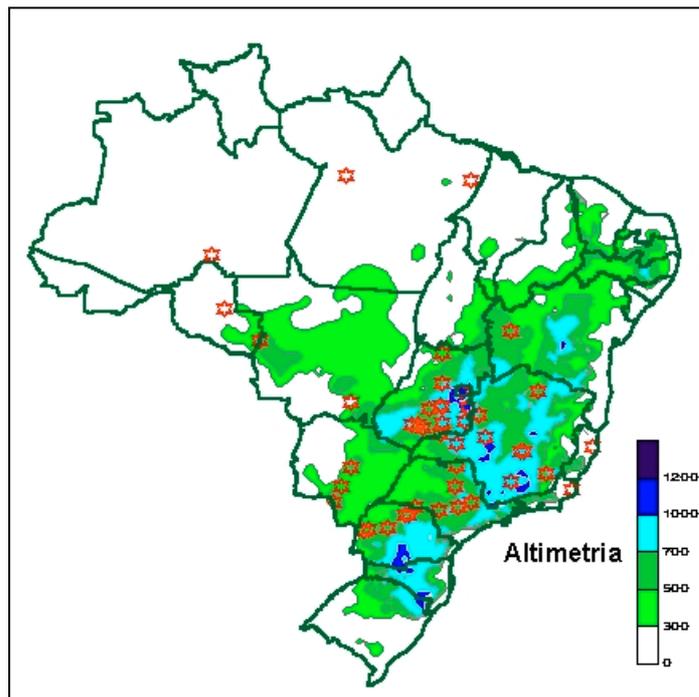


Figura 3. Localização geográfica dos locais de instalação dos experimentos (2000-2001) em relação à altitude (m). *In:* Guimarães, D.P. et al. Redes de Ensaios de cultivares de milho, coordenadas pelo CNPMS. Uma visão crítica. s/d, 11p. (Relatório técnico. Publicação restrita).

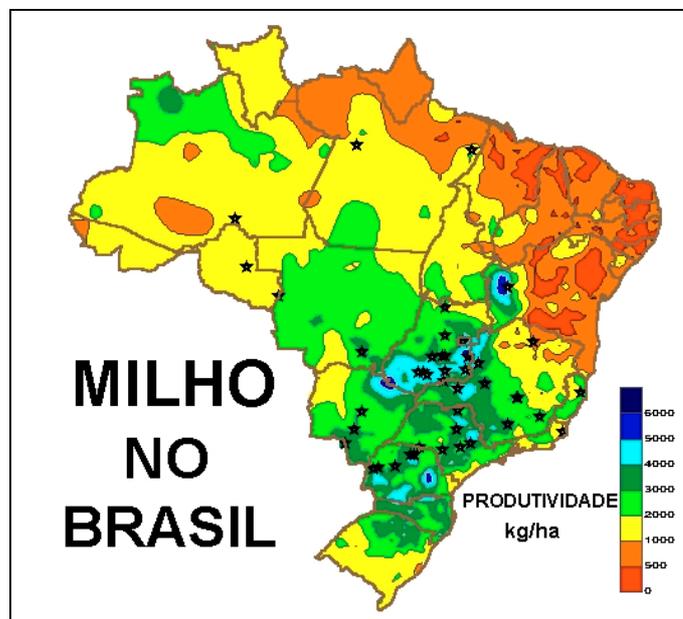


Figura 4. Localização geográfica dos locais de instalação dos experimentos (2000/2001) em relação à produtividade média de milho no Brasil entre 1995 e 2000 (Fonte: IBGE). *In:* Guimarães, D.P. et al. Redes de Ensaios de cultivares de milho, coordenadas pelo CNPMS. Uma visão crítica. s/d, 11p. (Relatório técnico. Publicação restrita).

Para ambas as regiões, Centro e Sul, e grupos de maturidade (Normal, Precoce e Superprecoce) a produtividade (kg/ha de grãos) seguiu a tendência decrescente para os materiais com *background* genético (Híbrido Simples, Híbrido Triplo e Variedade), respectivamente. Segundo Durães et al. (2002), este mesmo comportamento, embora mais disperso, foi observado para o Índice de Estresse Ambiental (bi), com base na produtividade de genótipos em diferentes altitudes (≥ 700 e < 700 m). Tanto para produtividade quanto para Índice de Estresse Ambiental, algumas variedades atingiram valores superiores à média, o que demonstra boa estabilidade de produção, inclusive em mais altos patamares de produção.

3. Caracterização de regiões tropicais baixas no Brasil

3.1. Fatores ambientais descritores para a produção de milho

Fatores da produtividade agrícola, ambientais primários (latitude, altitude, chuva, topografia, textura do solo, composição do solo) são de ação indireta, e os ambientais secundários (radiação solar, comprimento do dia, temperatura, água no solo, aeração do solo, minerais do solo) de ação direta, afetam os processos fisiológicos e consequentemente o rendimento de culturas (**Figura 5**, Dr. Paulo de Tarso Alvim, comunicação pessoal). Os efeitos dos estresses ambientais nas plantas são bastante complexos, mas sabe-se que estes processos são formados e desenvolvidos durante a ontogênese e que é baseado no procedimento filogênico de cada espécie.

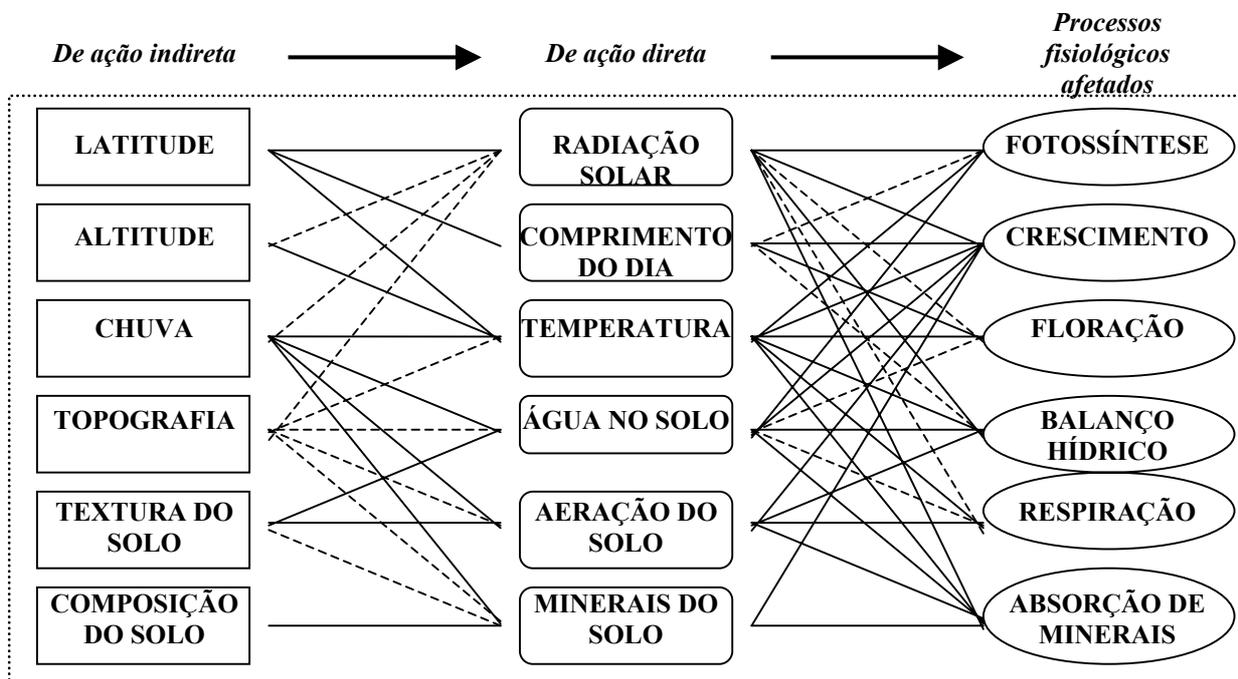


Figura 5. Fatores da produtividade agrícola.

O milho é cultivado em ampla faixa de condições edafoclimáticas e de manejo, dentro dos paralelos 55° de Sul a Norte, desde o nível do mar até altas altitudes e superiores a 3000 metros (Galinat, 1977).

4. Limitações fisiológicas do milho em trópicos baixos

Altitude influencia a temperatura e radiação solar, que afetam diretamente os processos fisiológicos de fotossíntese, crescimento, floração, balanço hídrico, respiração e absorção de nutrientes.

Limitações para rendimento de grãos em milho não explicado por fatores desfavoráveis tais como doenças, estado nutricional, estresse de umidade e acamamento podem ser analisadas em termos de oferta de assimilados para o grão (a fonte) e o potencial do grão para armazenar assimilados (o dreno).

As interações genótipo e ambiente determinam quais limitações predominam. O entendimento dos efeitos que os vários estádios do desenvolvimento vegetativo e reprodutivo tem no rendimento de grãos contribuem para elucidar as relações fonte-dreno em milho. Embora estudos das relações fonte-dreno em milho tem frequentemente revelado a natureza dos fatores limitantes para o rendimento de grãos, mecanismos de retro-alimentação podem ocultar a atual magnitude da limitação. A caracterização de genótipos e os efeitos ambientais, quanto ao início de primórdios florais e desenvolvimento dos eventos reprodutivos, período de florescimento masculino e feminino, na taxa e duração do desenvolvimento da espiga, duração do enchimento de grãos, incrementos de área e de senescência foliares, o ajustamento do tamanho do dreno para o tamanho da fonte e vice-versa

Antes que as principais recomendações fisiológicas possam ser feitas buscando-se a melhoria do rendimento em milho é essencial que a estrutura do rendimento seja analisada em termos das limitações de fonte e dreno. Segundo Tollenaar (1977), com esta informação, decisões podem ser tomadas visando modificações fenotípicas para a estrutura de planta ou fenologia que possam melhorar a produtividade de grãos.

4.1. Rendimento de milho em condições de trópicos baixos

A análise dos dados de Ensaios Nacionais de Cultivares de Milho (33 Normal, 71 Precoce e 32 Superprecoce – 2000/2001) em diversos locais das regiões centro (cerca de 37 cultivares) e sul (7 cultivares) do Brasil mostram menores produtividades de grãos de milho em baixas altitudes (<700 m) em relação a altas altitudes, apresentando maiores diferenças na região Sul, para todos os grupos de maturidade de milho (Durães, et al. 2002).

4.2. Respostas a fatores abióticos, com ênfase em temperatura e água

4.2.1. Temperatura

Temperatura é o mais importante entre todos os fatores ambientais que influenciam a taxa de desenvolvimento da planta. A resposta de temperatura da maioria dos processos metabólicos em milho são similares: a forma geral da curva de resposta para a extensão do crescimento de colmos e raízes, o aparecimento de novas folhas no verticilo ao longo do colmo, e fotossíntese foliar, mostram uma temperatura mínima entre 0 e 10 °C, um ótimo

de aproximadamente 30 °C, e um máximo acerca de 45 °C. Assim, a resposta da taxa de aparecimento foliar em milho para temperatura tem uma temperatura ótima de 31 °C e a taxa de aparecimento foliar é zero abaixo de 6 °C e acima de 45 °C (**Figura 6**, Tollenaar, M. Corn Maturity and Heat Units. <http://www.plant.uoguelph.ca>). A temperatura do ar é usada para quantificar a resposta do desenvolvimento da cultura para temperatura. Diferenças o ponto de crescimento por temperatura e temperatura do ar pode ser amplo quando (i) o ponto de crescimento está abaixo ou próximo da superfície do solo e o solo está úmido e frio; e, (ii) uma alta taxa de evaporação e/ou transpiração ocorre no ponto de crescimento, resultando em uma baixa temperatura no tecido da planta. A importância da temperatura no desenvolvimento de culturas agrícolas tem sido reconhecida por longo tempo e várias fórmulas simples tem sido desenvolvidas para registrar o efeito da temperatura no desenvolvimento da cultura (p.ex., sistemas de unidades de calor, como GDD- Growing Degree Day system/Graus Dia para Crescimento, e CHU- Crop Heat Units/Unidades de Calor para Culturas).

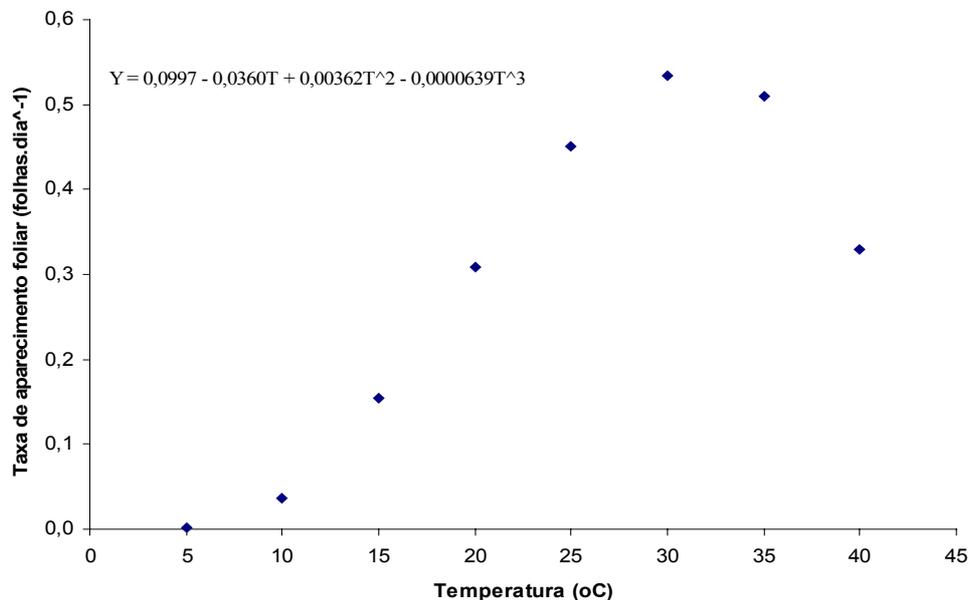


Figura 6. Resposta da taxa de aparecimento foliar em milho para temperatura.

O rendimento do milho pode ser reduzido, bem como pode ser alterada a composição protéica dos grãos, quando da ocorrência de temperaturas acima de 35-37°C (>3 horas), por ocasião do período de formação do grão. Tal efeito, na maior parte das vezes, pode estar relacionado à diminuição da atividade da redutase do nitrato, a qual afeta o processo de transformação do nitrogênio disponível para a planta. De igual forma, a elevação da temperatura contribui para a redução da taxa fotossintética líquida em função do aumento da respiração, afetando diretamente a produção. Por essa razão, temperaturas elevadas prevalentes no período noturno (>24°C) promovem um consumo energético demasiado, em função do incremento da respiração celular, ocasionando menor saldo de fotoassimilados, com conseqüente queda no rendimento da cultura. Cumpre salientar que a queda de rendimento em grãos, na condição mencionada (temperatura noturna elevada),

pode ser também determinada pela redução acentuada do ciclo da planta, em função do incremento da somatória térmica, conforme citado por Fancelli & Dourado-Neto (2000).

É compreensível que uma mais ampla variação estacional experimentada por uma planta ou comunidade de plantas pudesse ser a temperatura foliar noturna. A temperatura diária de plantas está fortemente condicionada pela radiação, dissipação de calor por convecção, re-radiação e evaporação que a temperatura do ar torna uma variante menor. A noite, o maior controle sobre a temperatura da planta deve ser a re-radiação devido a temperatura do ar.

Resultados experimentais e observações empíricas em áreas de produção mostram que altas temperaturas noturnas reduzem o rendimento de grãos (**Tabela 2**). Altas temperaturas noturnas tem também associação com precoce senescência e maturidade; conseqüentemente, o período de enchimento de grãos é reduzido. Embora a respiração devesse ser aumentada sob altas temperaturas noturnas, isto não é completamente confirmado por medidas experimentais. A possibilidade existe de que os tratamentos de alta temperatura noturna pudesse ter produzido estresse hídrico atmosféricamente induzido. A umidade relativa é usualmente monitorada, mas não controlada. Experimentos, em condições controladas, ainda precisam produzir um estudo compreensivo do efeito de várias temperaturas do ar nos parâmetros de respiração, níveis de metabólitos e enzimas, temperatura foliar, e potencial de água na folha.

Tabela 2. Efeito da temperatura média noturna no rendimento de grãos. (Adaptado de notas de D.B.Peters et al., s/d)

| Espécie e Tratamento | | Temperatura média noturna | Rendimento de Grãos ¹ | |
|----------------------|-----------------|---------------------------|----------------------------------|------|
| | | °C | kg.ha ⁻¹ | % |
| Milho | controle | 18,3 | 10.482 a | 1,00 |
| | frio | 16,6 | 10.168 a | 0,97 |
| | calor | 29,4 | 6.277 b | 0,60 |
| Trigo | controle | 8,9 | 2.556 a | 1,00 |
| | frio | 15,3 | 2.421 a | 0,95 |
| | calor | 26,5 | 1.345 b | 0,53 |
| Soja | controle | 18,3 | 3.565 a | 1,00 |
| | frio | 18,3 | 3.295 a | 0,92 |
| | calor | 29,4 | 2.959 b | 0,83 |

¹médias seguidas da mesma letra, por espécie, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (P>0,05).

A eficiência máxima de conversão da radiação solar é afetada pela temperatura diurna e noturna reinante no período, bem como pela amplitude térmica resultante. Assim, temperaturas diurnas relativamente elevadas (28-32°C) possibilitam altas taxas fotossintéticas, ao passo que temperaturas noturnas amenas (18-20°C) contribuem para o prolongamento do período de crescimento, assegurando à cultura maior número de dias para o aproveitamento efetivo da radiação incidente. Segundo Andrade et al. (1991) e Andrade (1992), a taxa de crescimento por unidade de tempo térmico, como medida de desempenho de variedades e híbridos de milho é uma medida conveniente, como mostra a **Tabela 3**.

Tabela 3. Radiação total incidente diária, soma térmica, radiação total incidente por unidade de tempo térmico para a floração e o rendimento do milho em zonas distintas.

| Local | Coordenada Geográfica (Latitude N S, Longitude W, Altitude m) | Radiação total (cal.cm⁻².dia⁻¹) | Soma térmica (*) (°C.dia⁻¹) | Radiação total/Unidade de tempo térmico (cal.cm⁻².°C⁻¹) | Rendimento (kg.ha⁻¹) |
|--|--|--|---|--|--|
| Terras Baixas (México) CIMMYT's lowland research station | Poza Rica, MX: 20° 29' N, 97° 45' W, 60 m Tlaltizapan, MX: 18° 4' N, 99° 08' W, 940 m | 440 | 15,0 | 29,3 | 5.500 |
| Terras Altas (México) | Texcoco, MX: 19° 52' N, -98° 88' W, 2.250 m | 550 | 11,5 | 47,8 | 9.000 |
| Greenfield (Califórnia/USA) | 36° 13' 43" N, 121° W, m | 542 | 9,6 | 56,5 | 10.600 |
| Davis (Califórnia/USA) | 38°33'14"N, 121°44'17"W, 8 m | 729 | 11,2 | 65,1 | 13.450 |
| Pergamino (Argentina) | -33° 53' 33" S, -60° 34' 21" W, 56 m | 650 | 11,3 | 57,5 | 11.500 |
| Balcarce (Argentina) | -37°45'S, 58°18'W, 130 m | 600 | 9,0 | 66,7 | 13.800 |

* (Temperatura Máxima + Temperatura Mínima)/2-10°C

Resultados experimentais indicam que a taxa efetiva de crescimento de grãos de híbridos de milho de diferentes ciclos é fortemente afetada pela temperatura. Segundo O incremento de massa seca no grão para o híbrido superprecoce (C-901) foi de 0,38 mg/dia.°C, e de 0,42 mg/dia.°C para os híbridos precoces (XL-560 e XL-212). Já nos híbridos de ciclo mais tardio estudados (XL-678, taxa efetiva de 0,25 mg/dia.°C, e XL-370, taxa efetiva de 0,29 mg/dia.°C), a taxa efetiva de crescimento de grãos foi menor e diferenciada daquelas observadas para os híbridos de ciclo precoce e superprecoce, em virtude de a fase de crescimento de grãos nesses híbridos ter ocorrido posteriormente à de híbridos de ciclo mais precoce, portanto em temperaturas mais baixas.

4.2.2. Deficiência Hídrica

No Brasil, estima-se que 14,8% da área plantada com milho é afetada pela seca, equivalendo a 1,9 milhões de hectares ou uma perda na produção de mais de 3,7 milhões de toneladas. Periodicamente, estas áreas são submetidas a condições de seca que afetam significativamente a produtividade, chegando até a uma perda total de produção.

Milho tem altos requerimentos de água e temperatura. Sua temperatura diária ótima para crescimento varia de 24 °C para 36 °C (Petr et al., 1988), e uma precipitação anual de 500 mm para 800 mm é preferencial. Como é de se esperar os requerimentos de precipitação variam com a umidade e clima. Em uma região tropical, 500 mm pode ser suficiente, mas em uma área de mais baixa umidade o requerimento pode exceder a 900 (Doorenbos and Kassam, 1986, 1992).

A distribuição de chuvas durante a estação de crescimento é também crítica. A umidade do solo é necessária para germinação e durante o seguinte período vegetativo, água torna-se crescentemente importante para a planta e desenvolvimento do sistema radicular. As duas fases mais sensíveis para o déficit hídrico são florescimento e formação do rendimento, durante o enchimento de grãos. No período de 3-5 dias da antese e polinização, chuva e umidade suportam o processo de transferência de pólen. A secagem dos estilo-estigmas ou a falha de polinização tem um severo impacto no rendimento. O

período de formação do rendimento é menos crítico, mas importante para o tamanho do grão. Durante o período de pós-maturidade fisiológica água tem muito pouco impacto no rendimento (Doorenbos e Kassam, 1986).

Estudos de estresse hídrico durante o desenvolvimento do milho indicam que o período de florescimento é o estágio mais sensível para a determinação da produção (**Figura 7 a,b**), e que reduções na produção de grãos e no número de grãos por planta podem ser superiores a 50% quando a seca coincide com este período (Durães et al. 2002, 2004).

O efeito do déficit hídrico sobre o rendimento de grãos de milho está relacionado ao período de ocorrência durante o desenvolvimento das plantas. A extensão dos efeitos do déficit hídrico na planta depende da sua intensidade e da duração da capacidade genética da planta em responder às mudanças do meio. O desenvolvimento de mecanismos de adaptação das plantas é influenciado pelo nível de CO₂, pela radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar (Grant, 1992). A resposta mais significativa das plantas ao déficit hídrico consiste no decréscimo da produção da área foliar, do fechamento dos estômatos, da aceleração da senescência e da abscisão das folhas, para algumas espécies (McCree & Fernández, 1989; e, Taiz & Zeiger, 1991). Quando as plantas são expostas a situações de déficit hídrico exibem, frequentemente, respostas fisiológicas que resultam, de modo indireto, na conservação da água no solo, como se estivessem economizando para períodos posteriores.

A água, além de ser necessária ao crescimento das células, é um elemento essencial para a manutenção da turgescência. Para Petry (1991) a importância da manutenção do turgor nas células é permitir a continuidade dos processos de crescimento vegetal, expansão, divisão celular e fotossíntese. Outro fator é a possibilidade de adiar a desidratação dos tecidos, podendo essas reservas serem usadas em períodos posteriores do ciclo da cultura. Uma vez iniciado o primórdio foliar, o tamanho final atingido é determinado pelo índice de duração da divisão e expansão celular. Experimentos de Paez et al. (1995) demonstraram que a expansão da célula foi o processo da planta mais sensível ao déficit hídrico. Outros efeitos do déficit hídrico incluem a redução no desenvolvimento das células, na expansão das folhas, transpiração e redução na translocação de assimilados (Hsiao, 1973). Michelena & Boyer, citados por Ball et al. (1994) apontam que plantas de milho não inibem a manutenção do turgor em condições de déficit hídrico, mas reduzem o desenvolvimento.

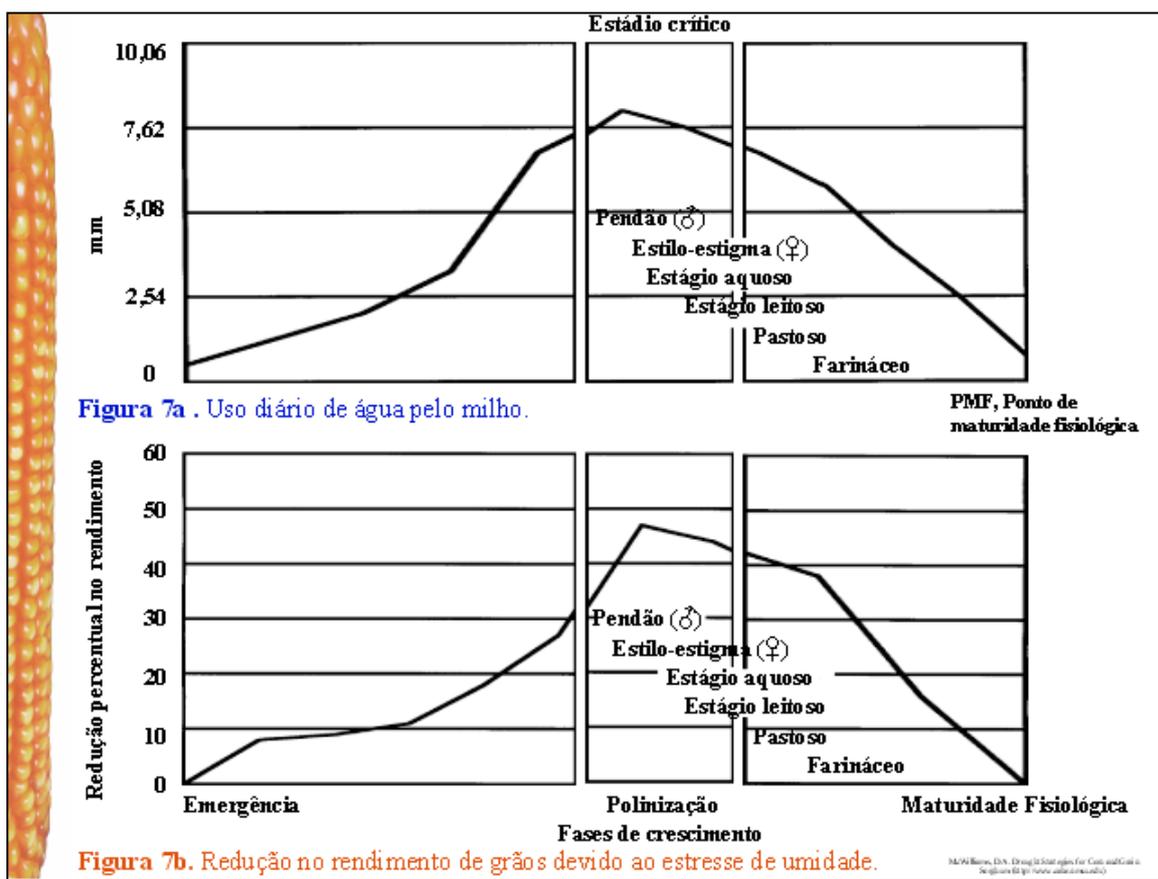


Figura 7 a,b. Uso diário de água (a) e redução do rendimento devido ao déficit hídrico (b), indicando períodos críticos durante o ciclo da cultura de milho. Modificado de Durães et al. (2005).

4.3. Respostas a fatores bióticos, com ênfase em doenças foliares

Doenças destacam-se, pela frequência da ocorrência e pelos danos causados, na germinação de sementes, emergência e estabelecimento de plântulas, podridões radiculares e da base do colmo, podridões de espiga e doenças foliares causadas por fungos. Também destaca-se nos órgãos aéreos do milho o enfezamento causado por micoplasma, tendo a cigarrinha como vetor transmissor.

As temperaturas do solo de 10 a 16 °C afetam negativamente a emergência das plântulas, e os fungos *Fusarium equiseti* e *F. oxysporum* Schlectend.:Fr. aumentaram sua incidência em sementes e plântulas podres à medida que a umidade volumétrica no solo aumentou (de 0,2214 a 0,3728 kg.kg⁻¹), de acordo com resultados de Severo (1999).

Resultados experimentais apontam que os fatores temperatura e conteúdo de água no solo, profundidade de semeadura, injúria mecânica visível em sementes de milho híbrido, possibilitam concluir que: decréscimos de temperatura em solo úmido reduzem a porcentagem de plântulas emersas, a duração e o índice de velocidade de emergência de plântulas e prorrogam o início da emergência; acréscimos no conteúdo de água em solo frio reduzem a porcentagem de plântulas emersas, a duração e o índice de velocidade de emergência de plântulas; acréscimos na profundidade de semeadura em solo frio e úmido

não reduzem a porcentagem de plantas emersas, porém, retardam o início e reduzem o índice de velocidade de emergência de plântulas; e, acréscimos no grau de injúria mecânica visível em sementes de milho, semeadas em solo frio e úmido reduzem a porcentagem de plântulas emersas e o índice de velocidade de emergência (Casa et al., 2000).

6. Considerações finais e conclusões

Altitude tem ação indireta na produtividade de milho, influenciando diretamente processos fisiológicos importantes, como fotossíntese, respiração, e absorção de água e nutrientes, etc. A constatação de que altitude, dentro de certos limites, limita a produção de grãos de milho, permite orientar a decisão quanto a escolha de cultivares, épocas de semeadura, adoção de determinadas práticas de manejo, bem como melhorar o entendimento quanto a rendimento potencial e rendimento atual, devido a fatores estressantes, de ação indireta ou direta, em processos fisiológicos que afetam o rendimento de grãos.

Os resultados observados demonstram que o rendimento de grãos, associado à radiação solar global média e a temperatura média do ar incidentes no período compreendido entre a emergência e espigamento, relativamente às épocas de plantio, são importantes informações a serem coletadas e analisadas em ensaios em rede.

A temperatura atua de forma inversamente proporcional ao número de grãos definidos por unidade de taxa de crescimento, caracterizando plantios mais precoces (temperaturas mais amenas) como “reprodutivos”, em comparação a plantios mais tardios (temperaturas mais elevadas), considerados como “vegetativos” (Cirilo e Andrade, 1994a). Como a taxa de crescimento aumenta de acordo com o aumento da temperatura, espera-se que em temperaturas mais elevadas as plantas acumulem mais massa seca do que em temperaturas mais amenas, por ocasião do espigamento (Cirilo e Andrade, 1994a). Em temperaturas inferiores a 20 °C, caso de plantios mais precoces, há redução na eficiência com a cultura de milho converte radiação solar em fitomassa (Andrade et al., 1993b). Esse fato faz com que o número de grãos determinado por unidade de taxa de crescimento, em plantios mais precoces seja maior do que em plantios mais tardios, possivelmente devido ao maior tempo disponível para interceptar radiação solar (Muchow et al., 1990). Apesar de se observar, nas semeaduras mais tardias, maior taxa de crescimento e maior fitomassa acumulada no espigamento, em comparação com plantios mais precoces, as plantas são menos eficientes em transformar a massa acumulada até o espigamento em maior número de grãos (Kiniry et al., 1989; Andrade et al., 1993a). Dessa forma, a maior produtividade de milho, notadamente na região Sul, será obtida em situações de elevada radiação solar incidente e sob temperaturas médias amenas, desde que não ocorram outras limitações ambientais ou de manejo da cultura.

7. Referências

- Andrade, F.H. **Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maiz.** Instituto Nacional de tecnologia agropecuária. Balcarce, Argentina. 34p. 1992 (Boletín Técnico, 106).
- Andrade, F.H., Uhart, S.; Arguissain, G. **Rendimiento potencial de maiz en Balcarce: analisis de los factores que lo determinan.** Instituto Nacional de tecnologia agropecuária. Balcarce, Argentina. 11p., 1991. (Boletín Técnico, 101).

- Andrade, F.H.; Uhart, S.A.; Frugone, M. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: hade versus plant density effects. **Crop Science**, Madison. v.33, p. 482-485, 1993a
- Andrade, F.H.; Uhart, S.A.; Cirilo, A.G. Temperature effects radiation use efficiency in maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.32, p. 17-25, 1993b
- Badu-Apraku, B.; Hunter, R.B.; Tollenaar, M. Effect of temperature during grain filling on whole plant and grain yield in maize (*Zea mays* L.). **Canadian Journal of Plant Science**, 63(2):357-63, 1983.
- Ball, R.A.; Oosterhuis, D.M.; Mauromoustakos, A. Growth dynamics of the cotton plant during water-deficit stress. **Agronomy Journal**, Madison, v.86, p. 788-795, 1994.
- Casa, R.T.; Reis, E.M.; Severo, R.; Denti, E.; Trento, S.; Blum, M.M.C. Prevenção e controle de doenças na cultura do milho. 131-146 p. **In: Milho: Estratégias de Manejo para a Região Sul.** (Ed.) I.E.Sandini e A.L. Fancelli. Guarapuava : Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2000. 209 p.
- Cirilo, A.G. e Andrade, F.H. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. **Crop Science**, Madison. v.34, p. 1039-1043, 1994.
- Derieux, M.; Bonhomme, R.; Duburcq, J.B.; Ruget, F.; Vincourt, P. Influence du genotype et du lieu sur le nombre d'ovules presents a la floraison chez le mais. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, 63(2):371-5, 1983.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H. (1986) Yield Response to Water, Irrigation and Drainage Paper 33. Food and Agricultural Organization of the United Nations: Rome.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1992) Crop Water Requirements, Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agricultural Organization of the United Nations: Rome.
- Durães, F.O.M.; Corrêa, L.A.; Cruz, J.C.; Oliveira, A.C.; Magalhães, .C.; Shanahan, J.F. Estabilidade do rendimento e tolerância a estresses em genótipos de milho cultivados nas regiões Centro e Sul do Brasil. **In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO**, 24., 2002, Florianópolis, SC. Meio ambiente e a nova agenda para o agronegócio de milho e sorgo... Resumos expandidos. Sete Lagoas: ABMS/Embrapa Milho e Sorgo/EPAGRI, 2002a. CD-ROM. Seção Trabalhos.
- Durães, F.O.M.; Magalhães, P.C.; Oliveira, A.C. Índice de colheita genético e as possibilidades da genética fisiológica para melhoramento do rendimento de milho. *Rev. Bras. de Milho e Sorgo*, v.1, n.1, p.33-40, 2002b.
- Durães, F.O.M.; Magalhães, P.C.; Oliveira, A.C.; Santos, M.X.dos; Gama, E.E.G.; Guimarães, C.T. Combining ability of tropical maize inbred lines under drought stress conditions. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.2, n.2, p. 291-298, 2002c.
- Durães, F.O.M.; Santos, M.X.dos; Gama, E.E.G.; Magalhães, P.C.; Albuquerque, P.E.P.; Guimarães, C.T. **Fenotipagem associada a tolerância a seca em milho para uso em melhoramento, estudos genômicos e seleção assistida por marcadores.** (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 35). 2004. 20 p.
- Durães, F.O.M.; Gama, E.E.G.; Santos, F.G.dos; Guimarães, C.M.; Ribeiro Jr., W.Q.; Trindade, M.G.; Gomide, R.L.; Albuquerque, P.E.P. **Fenotipagem para tolerância a seca: protocolos e características específicas visando o melhoramento genético de cereais.** Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica No. 54, Dez./2005, 17p.
- Duvick, D.N. 1997. What is yield? **In: Edmeades, G.O., Bänzinger, B., Mickelson, H.R., Pena-Valdivia, C.B. (Ed.) Developing Drought and Low N-Tolerant Maize.** CIMMYT, El Batán, Mexico, pp. 332-335.

- Duvick, D.N. 1992. Genetic contributions to advances in yield of U.S. maize. **Maydica** 37, 69-79.
- EMBRAPA MILHO E SORGO. **Ensaio Nacionais de Cultivares de Milho Normal 2000/2001**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001a. 68 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 10).
- EMBRAPA MILHO E SORGO. **Ensaio Nacionais de Cultivares de Milho Precoce 2000/2001**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001b. 70 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 11).
- EMBRAPA MILHO E SORGO. **Ensaio Nacionais de Cultivares de Milho Normal 2000/2001**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001c. 69 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 12).
- Evans, L.T. The physiological basis of crop yield. *In:* _____, ed. **Crop Physiology**; some case histories. London, Cambridge Univ. Press, 1975. p. 327-55.
- Fancelli, A.L. & Dourado-Neto, D. **Produção de Milho**. Ed. Agropecuária, Guaíba. 360 p., 2000.
- Fisher, K.S. & Palmer, A.F.E. Maize. *In:* SYMPOSIUM ON POTENTIAL PRODUCTIVITY OF FIELD CROPS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS, Los Baños, 1983. **Proceedings** ... Los Baños, IRRI, 1983. p. 155-80.
- Frey, K.J. Improving crop yields through plant breeding. *In:* Moving off the yield plateau. ASA, 1971. (ASA Special Publication, 20)
- Galinat, W.C. The origin of corn. 1-47 p. *In:* CORN AND CORN IMPROVEMENT. (Ed.) Sprague, G.F., Madison, ASA (Series AGRONOMY, no. 18), 1977. 774 p.
- Gifford, R.M. & Evans, L.T. Photosynthesis, carbon partitioning, and yield. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, 32:485-509, 1981.
- Goldsworthy, P.R. & Colegrove, M. Growth and yield of highland maize in Mexico. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, 83:213-21, 1974.
- Goldsworthy, P.R.; Palmer, A.F.E.; Sperling, D.W. Growth and yield of lowland tropical maize in Mexico. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, 82:223-30, 1974.
- Yamaguchi (1974)
- Grant, R.F. Interaction between carbon dioxide and water deficits affecting canopy photosynthesis: simulation and testing. **Crop Science**, Madison, v.32, p. 1322-1328, 1992.
- Hsiao, T.C. Plant response to water stress. **Annual Review of Plant Physiology**, v.24, p. 519-570, 1973.
- Kiniry, J.R.; Jones, C.A.; O'Toole, J.C.; Blanchet, R.; Cabelguenne, M.; Spanel, D.A. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.20, p. 51-64, 1989.
- McCree, K.J.; Fernández, C.J. Simulation model for studying physiological water stress responses of whole plants. **Crop Science**, Madison, v.29, p.353-360, 1989.
- Muchow, R.C.; Sinclair, T.R.; Bennett, J.M. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. **Agronomy Journal**, Madison, v.82, p. 338-343, 1990.
- Mundstock, C.M. Ciclo de crescimento e desenvolvimento de seis cultivares de milho em quatro épocas de semeadura. *In:* REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO, 8., Porto Alegre, 1970. **Anais** ... p. 18-29.
- Páez, A.; Gonzáles, M.E.; Yrausquín, O.X. Water stress and clipping management effects on guineagrass. I. Growth and biomass allocation. **Agronomy Journal**, Madison, v.87, p. 698-706, 1995.

- Palmer, A.F.E.; Heichel, G.H.; Musgrave, R.B. Patterns of translocation, respiratory loss, and redistribution of ^{14}C in maize labeled after flowering. **Crop Science**, Madison, 13:371-6, 1973.
- Petr J., Cerny V., Hruska L. Yield Formation in the Main Field Crops. 1988. Elsevier: Oxford.
- Petry, C. **Adaptação de cultivares de soja a deficiência hídrica no solo**. Santa Maria: UFSM, 1991. 106 p. Dissertação Mestrado.
- Richards, R.A. Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops. **Journal of Experimental Botany**, Oxford. v. 51, p. 447-458, 2000.
- Rodrigues, O. & Didonet, A. D. **Crescimento e desenvolvimento de milho: efeito da temperatura na duração e na taxa de crescimento de grãos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2003. 24 p. (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa, 15).
- Severo, R. **A emergência de milho: os efeitos de fatores bióticos e abióticos** (Tese de Doutorado). Porto Alegre, RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1999.
- Taiz, L.; Zeiger, Plant Physiology. California: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Redwood City, 1991.
- Tollenaar, M. Sink-source relationships during reproductive development in maize. A review. **Maydica**, 22 (1977):49-75.
- Tollenaar, M., Wu, J., 1999. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. **Crop Sci.** 39, 1597-1604.
- Tollenaar, M.; Ying, J., Duvick, D.N., 2001. Genetic gain in corn hybrids. **In: Loden, H.D. and Wilkinson, D. (Ed.) Proc. Annu. Corn and Sorghum . In: Res. Conf., 55th, Chicago, IL, 6-8 Dec. 2000. Am. Seed Trade Assn., Washington, D.C.**
- Williams, W. A.; Loomis, R.S.; Lepley, C.R. Vegetative growth of corn as affected by population density. II. Components of growth, net assimilation rate and leaf area index. **Crop Science**, Madison, 5:215-9, 1965.
- Wilson, J.H.; Clowes, M.St.J.; Allison, J.C.S. Growth and yield of maize at different altitudes in *Rhodesia*. **Annals of Applied Biology**, 73(1):77-84. 1973.
- Yamaguchi, J. Varietal traits limiting the grain yield of tropical maize. IV. Plant traits and productivity of tropical varieties. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, 20:287-304, 1974.