



O MILHO E O CLIMA

Homero Bergamaschi
Ronaldo Matzenauer



O MILHO E O CLIMA

Homero Bergamaschi

Ronaldo Matzenauer

Porto Alegre, RS
2014

© 2014 Emater/RS-Ascar

Parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca da Emater/RS-Ascar

B493m Bergamaschi, Homero.
O milho e o clima / Homero Bergamaschi e Ronaldo Matzenauer. - Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014.
84 p. : il.

Compõe este documento pesquisas realizadas pelos autores, que autorizaram a Emater/RS-Ascar fazer esta edição.

ISBN: 978-85-98842-11-0

1. Milho. 2. Clima. I. Matzenauer, Ronaldo.

CDU 633.15

REFERÊNCIA

BERGAMASCHI, Homero; MATZENAUER, Ronaldo. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p. il.

Emater/RS-Ascar- Rua Botafogo, 1051 - 90150-053 – Porto Alegre/RS - Brasil
Fone (0XX51) 2125-3144
<http://www.emater.tche.br> E-mail: biblioteca@emater.tche.br.

Normalização: Cleusa Alves da Rocha – CRB 10/2127
Felipe Chagas Tedesco – CRB 10/2157

Diagramação: Felipe Chagas Tedesco

Capa: Roseana Kreidt

AUTORES

Homero Bergamaschi

Engenheiro agrônomo, mestre em Ciências do Solo pela UFRGS, doutor em Agronomia pela USP e pós-doutorado pela University of Reading, Reino Unido. Professor da Faculdade de Agronomia da UFRGS e pesquisador do CNPq.
E-mail: homerobe@ufrgs.br

Ronaldo Matzenauer

Engenheiro agrônomo, mestre em Agronomia, área de concentração Fitotecnia e doutor em Fitotecnia, área de concentração Agrometeorologia pela UFRGS. Pesquisador da FEPAGRO/SEAPA-RS.
E-mail: ronaldo-matzenauer@fepagro.rs.gov.br

APRESENTAÇÃO

É com enorme satisfação que a EMATER RS/ASCAR, apresenta este novo trabalho de Homero Bergamaschi e Ronaldo Matzenauer, autores e pesquisadores que acumulam longa experiência na área de pesquisa e produção do milho no Rio Grande do Sul, e que tem seus nomes associados à evolução da produtividade do milho no Estado. O primeiro pela Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e o segundo pela Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO).

A primeira parte do livro caracteriza de forma bastante didática o desenvolvimento da planta de milho, e a importância do conhecimento de cada uma das fases fenológicas da cultura, levando em conta as relações com as condições do ambiente para um eficiente manejo da cultura a fim de que se obtenha boa produtividade e qualidade do produto colhido. Na segunda parte os pesquisadores analisam a radiação solar e sua interceptação pelo milho, apresentam gráficos e fotos que caracterizam e justificam os efeitos da radiação e a necessidade de avanços na pesquisa visando aumento de eficiência, principalmente pelo milho ser uma planta de metabolismo C4, ou seja, tem melhor eficiência fotossintética, em relação às plantas de outras espécies cultivadas. Na terceira parte da obra os autores discutem as necessidades térmicas e o fotoperíodo na cultura do milho, bem como destacam a importância da soma térmica para ocorrência das diferentes fases de desenvolvimento da cultura, assim como as relações entre fotossíntese e respiração das plantas de milho. Por fim, são conceituados os itens relacionados às necessidades hídricas das plantas e é destacada a disponibilidade hídrica para a cultura, relacionando-a com o clima e as produtividades obtidas ao longo das safras, e discutida a importância da utilização destes conceitos para a tomada de decisão em relação ao manejo da cultura.

Gervasio Paulus

Engenheiro Agrônomo e Diretor Técnico da Emater/RS

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	5
1 FENOLOGIA DO MILHO	10
1.1 IMPORTÂNCIA DA FENOLOGIA DAS PLANTAS	10
1.2 PRINCIPAIS ESCALAS FENOLOGICAS PARA MILHO.....	11
1.2.1 Escala de Hanway (1963).....	11
1.2.2 Escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993).....	12
1.3 DESCRIÇÃO DOS ESTÁDIOS DO MILHO, SEGUNDO RITCHIE, HANWAY E BENSON (1993)	12
REFERÊNCIAS	20
2 RADIAÇÃO SOLAR	22
2.1 O MILHO COMO ESPÉCIE C ₄	22
2.2 INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA CULTURA DO MILHO	24
REFERÊNCIAS	31
3 TEMPERATURA E FOTOPERÍODO.....	33
3.1 NECESSIDADES TÉRMICAS E FOTOPERIÓDICAS DO MILHO	33
3.2 POSSÍVEIS LIMITAÇÕES TÉRMICAS PARA MILHO NO BRASIL.....	41
REFERÊNCIAS	44
4 DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	47
4.1 INTRODUÇÃO.....	47
4.2 NECESSIDADES HÍDRICAS DAS PLANTAS	48
4.2.1 Evaporação, transpiração e evapotranspiração	48
4.2.2 Determinação da evapotranspiração	49
4.2.3 Relações entre evapotranspiração máxima e parâmetros meteorológicos	50
4.2.4 Ocorrência de déficit hídrico nas plantas.....	53
4.2.5 Efeitos do déficit hídrico	55
4.2.6 Período crítico do milho	57
4.2.7 Relação entre o rendimento de grãos e condições pluviométricas	61
4.2.8 Evapotranspiração máxima (ET _m) do milho	64
4.2.9 Coeficientes relacionando ET _m com ET _o , E _o e R _s	68
REFERÊNCIAS	75
5 EVENTOS ADVERSOS.....	79
5.1 GEADAS, GRANIZO E VENDAVAS	80
5.2 SECAS E ESTIAGENS.....	82
REFERÊNCIAS	85

1 FENOLOGIA DO MILHO

1.1 IMPORTÂNCIA DA FENOLOGIA DAS PLANTAS

A fenologia das plantas tem diversas aplicações importantes no campo da agricultura. Ela é definida como o ramo da Ecologia que estuda os fenômenos periódicos dos seres vivos e suas relações com o ambiente (BERGAMASCHI, 2007). Em razão de suas múltiplas aplicações, pode-se dizer que a fenologia das plantas é fundamental em todo o grande espectro da Biologia, tanto vegetal como animal. Em Agronomia ela é ferramenta indispensável e de uso generalizado, tanto em áreas básicas como aplicadas.

Na Agrometeorologia a fenologia das plantas é indispensável sob vários aspectos. Ela é indispensável em estudos e aplicações que envolvem as interações clima-planta, como zoneamentos agroclimáticos, calendários de semeadura e plantio, modelagem de cultivos, monitoramento de safras, avaliação de riscos climáticos, cultivos protegidos, irrigação, entre outras. A fenologia das culturas é fundamental na avaliação de impactos da variabilidade climática em escala espaço-temporal ou de futuros cenários, à luz das relações clima-planta.

A caracterização dos eventos fenológicos permite identificar todo desenvolvimento das plantas, a fim de estabelecer relações com as condições do ambiente (clima, em particular), sob diferentes ambientes (anos, épocas ou locais). Com isto, torna-se possível avaliar e descrever com precisão o impacto de eventuais fenômenos adversos. A caracterização das necessidades e sensibilidades das espécies também necessita descrever suas etapas fenológicas. A determinação de períodos críticos é um aspecto particular na definição das necessidades e sensibilidades das espécies, visando reduzir danos por eventos climáticos extremos. Classificar genótipos segundo sua precocidade também é fundamental e requer precisão na descrição fenológica. Com a duração do ciclo e seus períodos críticos é possível planejar a implantação e o manejo das espécies, para diluir prejuízos por estresses climáticos e racionalizar atividades de condução das lavouras. A elaboração e a utilização adequada de zoneamentos é outra importante aplicação da fenologia, visando adequar as necessidades das plantas às disponibilidades do ambiente. Por fim, a escolha de genótipos, épocas e locais para cultivo e o manejo das espécies também exigem detalhes de fenologia, pois suas demandas variam

durante o ciclo. Isto tudo permite o uso mais racional dos recursos naturais, da mão-de-obra e insumos (BERGAMASCHI, 2007).

1.2 PRINCIPAIS ESCALAS FENOLÓGICAS PARA MILHO

1.2.1 Escala de Hanway (1963)

A fenologia do milho, a exemplo de outras culturas importantes, vem merecendo atenção e estudos continuados. Durante as últimas décadas do Século XX, a escala fenológica descrita por Hanway (1963, 1966) foi a mais utilizada em todo o mundo. Ela consta de uma sequência de estádios numerados em ordem crescentes, da emergência das plântulas à maturação fisiológica dos grãos. Sua clareza e simplicidade tornaram esta escala amplamente conhecida e adotada, internacionalmente.

No Brasil, Fancelli (1986) fez adaptações à clássica escala de Hanway (1963, 1966); e Nel e Smith (1976). Foi acrescentada a duração média dos intervalos entre os estádios da cultura, considerando uma ampla faixa de genótipos e climas brasileiros. A representação gráfica de cada estágio também deu mais clareza e praticidade ao uso da escala, para caracterizar com mais precisão a fenologia do milho no campo. O Quadro 1 apresenta a adaptação feita por Fancelli (1986) à fenologia do milho, baseada na escala de Hanway (1963).

Quadro 1 – Escala fenológica do milho segundo Hanway (1963), adaptada por Fancelli (1986).

Estádios (símbolo)	Descrição Dos estágios	Tempo decorrido (dias / semanas)
0	Emergência das plântulas	0 (estádio inicial da planta)
1	Quatro folhas desdobradas	2 semanas após emergência
2	Oito folhas desdobradas	4 semanas após emergência
3	Doze folhas desdobradas	6 semanas após emergência
4	Pendoamento	8 semanas após emergência
5	Florescimento (espigamento)	9 a 10 semanas após emergência
6	Grãos leitosos	12 dias após a polinização
7	Grãos pastosos	24 dias após a polinização
8	Grãos farináceos	36 dias após a polinização
9	Grãos duros	48 dias após a polinização
10	Maturação fisiológica	55 dias após a polinização

Fonte: FANCELLI, 1986.

1.2.2 Escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993)

Ao final do Século XX, a escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993) passou a ser adotada na descrição da fenologia do milho. Ela manteve grande parte dos critérios da escala de Hanway (1963), sobretudo nos estádios reprodutivos. Porém, os estádios vegetativos passaram a ter maior detalhamento. A cada nova folha totalmente expandida corresponde um estágio vegetativo. Os símbolos que representam os estádios vegetativos são formados pela letra V e um algarismo que corresponde ao número de folhas totalmente expandidas. Os estádios reprodutivos passaram a ter símbolos formados pela letra R e um algarismo correspondente à sequência dos mesmos estádios da escala de Hanway (1963). O Quadro 2 apresenta a escala fenológica de Ritchie, Hanway e Benson (1993).

O avanço nos recursos digitais, sobretudo de fotografia e acesso à Internet, permitiu melhorar a visualização e o detalhamento da escala fenológica de Ritchie, Hanway e Benson (1993). Também, os critérios descritos para cada estágio podem ser vistos em detalhes no amplo material bibliográfico disponível. Assim, além das fontes originais, diversas instituições de pesquisa, ensino e extensão já disponibilizam material neste sentido, mesmo no Brasil (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993; KUMUDINI; TOLLENAAR, 1998; MAGALHÃES et al., 2002; NIELSEN, 2005; MAGALHÃES; DURÃES, 2006; NIELSEN, 2007a, 2007b, 2007c).

Com os avanços em critérios de observação e as facilidades em sua visualização pela Internet, o emprego de escalas fenológicas padronizadas tem-se expandido, muito além do uso em trabalhos científicos. Publicações técnicas, como as de Magalhães et al. (2002) e Magalhães e Durães (2006) possibilitam o amplo acesso à escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993) e seu uso por profissionais de diferentes setores ligados à cultura do milho.

1.3 DESCRIÇÃO DOS ESTÁDIOS DO MILHO, SEGUNDO RITCHIE, HANWAY E BENSON (1993)

A seguir, é feita a descrição dos principais estádios fenológicos do milho segundo a escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993). Além das características anatômicas necessárias à identificação de cada estágio, foram acrescentadas

algumas informações sobre os processos e principais necessidades que as plantas apresentam, sobretudo relacionadas à ocorrência de estresses ambientais.

Quadro 2 – Estádios fenológicos de uma planta de milho, pela escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993).

<p>Estádios vegetativos</p> <p>VE emergência V1 primeira folha V2 segunda folha V3 terceira folha V(n) enésima folha VT pendoamento</p> <p>Estádios reprodutivos</p> <p>R1 espigamento (polinização) R2 grão em bolha R3 grão leitoso R4 grão pastoso R5 grão dentado R6 maturação fisiológica</p>
--

Fonte: RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993.



VE – Emergência. Plântulas emergem do solo. É o primeiro estágio vegetativo (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



V3 – Três folhas já estão completamente desenvolvidas (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).

A temperatura é o principal elemento determinante da emergência das plântulas e da taxa de aparecimento de novas folhas.

Ao redor do estágio V5, todos os primórdios de folhas e espigas já se formaram e um pendão microscópico já se existe no ápice do caule, que ainda permanece debaixo ou ao nível do solo.

A temperatura do solo ainda tem grande influência sobre o ponto de crescimento, a emissão de novas folhas, o número de folhas e o tempo de emissão do pendão. Geadas, granizo e ventos podem danificar as folhas já formadas, mas têm pouco efeito sobre o ponto de crescimento e o rendimento final de grãos. Por outro lado, alagamento pode matar a planta em poucos dias, principalmente com elevadas temperaturas (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



V6 – Seis folhas completamente desenvolvidas. O ponto de crescimento e o pendão já estão acima do nível do solo e o caule inicia um rápido alongamento (RITCHIEHANWAY; BENSON, 1993).



V9 – Nove folhas completamente desenvolvidas (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).

Em V9 muitos primórdios de espigas já são visíveis por dissecação, em cada nó acima do solo, exceto nos 6 a 8 nós abaixo do pendão. Porém apenas um ou dois primórdios de espiga, localizados mais acima, se desenvolverão para serem colhidas. Em baixas densidades de semeadura as plantas podem ser mais prolíficas, ou seja, podem produzir mais de uma espiga por colmo, dependendo do genótipo. O caule tem rápido crescimento, por alongamento de internós, e o pendão também começa a se desenvolver rapidamente. Em torno de V10 o tempo de aparecimento de novas folhas é muito curto,

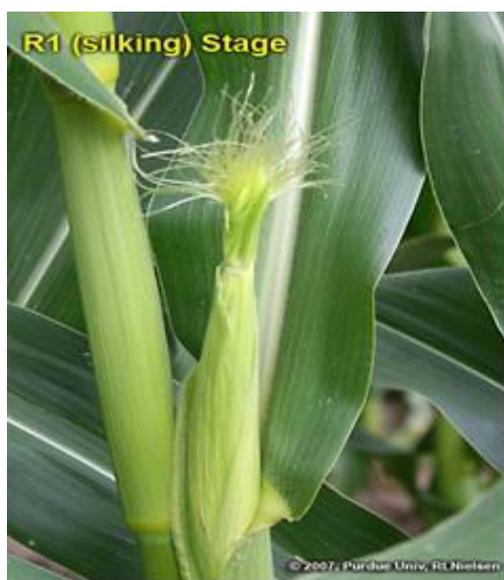
da ordem de 2 a 3 dias. As plantas iniciam um rápido aumento no acúmulo de nutrientes e matéria seca, que continuará durante o período reprodutivo. A demanda por água e nutrientes aumenta, na medida do aumento na taxa de crescimento (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



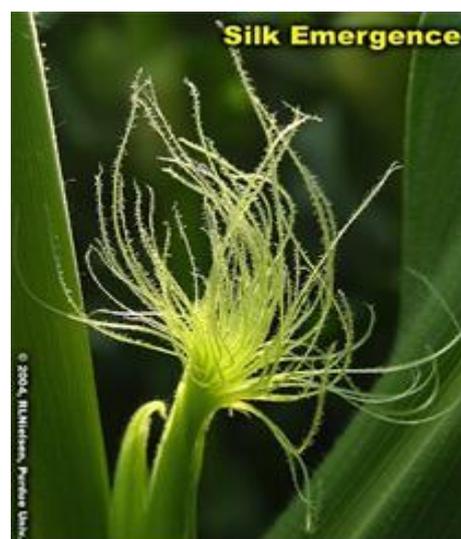
VT – Pendoamento. A inflorescência masculina (pendão) emerge da bainha da folha-bandeira. Ela contém as flores masculinas, que produzirão o pólen necessário à fecundação dos óvulos, localizados na inflorescência feminina (espiga). É o último estágio vegetativo (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



Antese - É quando os estames liberam o pólen (não é considerado um estágio). Ao se depositar sobre os estigmas, inicia-se o processo de fecundação dos óvulos. Começa, então, o período de formação dos grãos do milho, que dura cerca de 60 dias. O enchimento de grãos será o dreno preferencial das reservas e fotossintatos produzidos pela planta (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



R1 – Espigamento. Aparecimento da espiga e emergência dos estigmas, quase em sincronia com a antese (NIELSEN, 2007c).



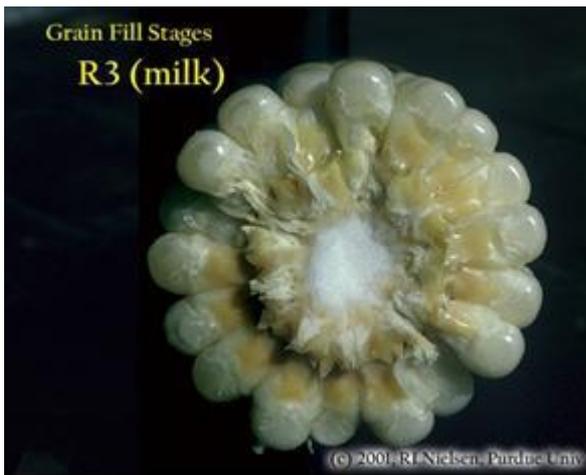
R1 – Espigamento. Estigmas recebem pólen por até 10 dias. Após, inicia-se um colapso de tecidos que impede o crescimento do tubo polínico (NIELSEN, 2007a; RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



R2 – Grão em bolha. Após a secagem dos estigmas, começa o acúmulo de amido no endosperma. O embrião já tem os órgãos básicos formados. Os grãos têm cerca de 85% de umidade (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



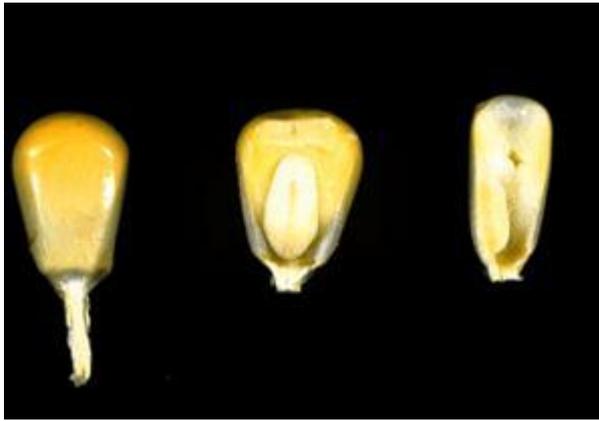
R2 – Grão em bolha. Um estresse severo pode abortar os grãos, antes e durante este estágio (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993; NIELSEN 2007c).



R3 – Grão leitoso. Um estresse severo ainda pode abortar o grão (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993; NIELSEN, 2007c).



R3 – Grão leitoso. A divisão de células do endosperma está praticamente completa. O grão cresce basicamente por expansão celular e acúmulo de amido. Os grãos contêm cerca de 80% de umidade (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



R4 – Grão pastoso. O grão ainda cresce e tem sua extremidade arredondada. O conteúdo de umidade é da ordem de 70% (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



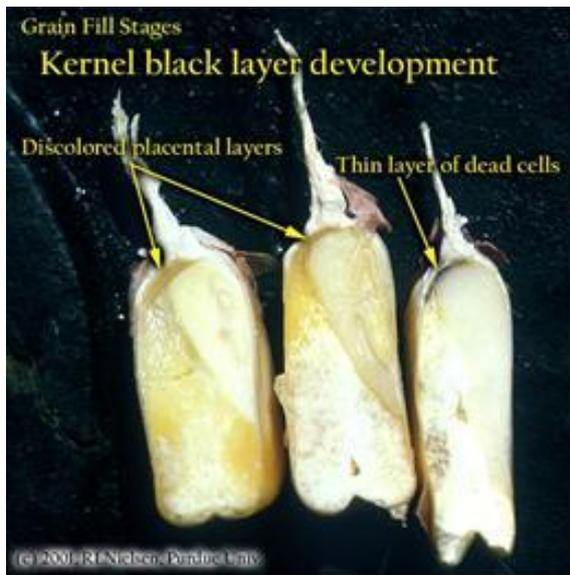
R4 – Grão pastoso. O acúmulo de amido continua no endosperma, cuja consistência é pastosa (NIELSEN, 2007c).



R5 – Grão dentado. Ao final do estágio R5 começa a descoloração das células placentárias na base dos grãos (NIELSEN, 2007c).



R5 – Grão dentado. No detalhe, a concavidade na forma de dente. A extremidade dos grãos é sólida e a base é pastosa. A umidade é de cerca de 55% (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



R6 – Maturação fisiológica. Grãos atingem o máximo peso de matéria seca. Forma-se uma camada escura na base, por descoloração das células placentárias (NIELSEN, 2007c).



R6 - Maturação fisiológica. A umidade dos grãos está em torno de 30%, mas pode variar de 25 a 40%. Mesmo estresses severos têm pouco efeito sobre o rendimento de grãos, a menos que a integridade do amido seja afetada (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).



Maturação de colheita. Não é propriamente um estágio fenológico. Ela é definida, muitas vezes, pelo conteúdo de umidade que permite a colheita, sem danos aos grãos ou perdas na colheita. A maturação de colheita é geralmente considerada quando a umidade dos grãos está em torno de 25% (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).

A sequência de formação dos componentes do rendimento de grãos é importante para entender as necessidades das plantas, a sensibilidade da cultura às condições de ambiente e seus períodos críticos à ocorrência de estresses.

O número de fileiras de grãos nas espigas é determinado fortemente pelo genótipo e não pelo ambiente. Porém, o número de grãos (comprimento da espiga) é afetado por estresses ambientais, o que o torna variável segundo as condições do meio (NIELSEN, 2007b).

Em V12 começam a se definir o número de óvulos (grãos em potencial) e o tamanho das espigas, embora o número de fileiras de grãos por espiga já esteja definido em V5. Mas, o número final de grãos por fila estará completo somente uma semana antes do espigamento (em torno de V17). Neste período de formação de óvulos e espigas estresse por água ou nutrientes reduzem seriamente o número de grãos e o tamanho das espigas na colheita (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).

Segundo Nielsen (2007b), o tamanho potencial da espiga (número de óvulos) é determinado num longo período, que vai do estágio V5 até provavelmente V15. Porém, a percentagem de óvulos fertilizados, para início da formação de grãos, depende do sucesso ou falha na polinização (NIELSEN, 2007a).

O número final de grãos por espiga é definido em uma ou duas semanas após a polinização (NIELSEN, 2005) e o peso de grãos é determinado ao longo do restante do período de “enchimento de grãos”, que termina na maturação fisiológica (NIELSEN, 2007c).

Grande redução no rendimento de grãos pode ser causada por estresses hídricos, entre duas semanas antes e duas semanas após o espigamento. A maior redução resulta de estresse no espigamento (R1). Isto também é verdadeiro com outros tipos de estresses ambientais, como de nutrientes, altas temperaturas ou granizo. No uso da irrigação o período de quatro semanas ao redor do espigamento é o mais importante (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).

Polinização deficiente causa falha na fecundação de óvulos e reduz o número de grãos por espiga, deixando parte do sabugo à mostra. Períodos prolongados de déficit hídrico, associados a altas temperaturas, podem retardar a emissão dos estigmas, impedindo a polinização (NIELSEN, 2005).

Após a polinização, os grãos em início de formação (sobretudo na ponta da espiga) podem ser abortados por estresses severos, se houver forte redução no suprimento de fotossintatos. As causas podem ser déficit hídrico, altas temperaturas, baixa radiação solar ou redução drástica da área foliar. Noites quentes na polinização ou no início de formação dos grãos é outra causa provável, por reduzir a quantidade de fotossintatos disponíveis por unidade de graus-dia acumulados (NIELSEN, 2005).

REFERÊNCIAS

BERGAMASCHI, H. O clima como fator determinante da fenologia das plantas. In: REGO, G. M.; NEGRELLE, R. R. B.; MORELLATO, L. P. C. **Fenologia**: ferramenta para conservação, melhoramento e manejo de recursos vegetais arbóreos. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2007. 1 CD-ROM.

FANCELLI, A. L. **Plantas Alimentícias**: guia para aula, estudos e discussão. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986. 131 p.

_____.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária. 2000. p. 251-254.

HANWAY, J. J. Growth stages of corn (*Zea mays*). **Agronomy Journal**, Madison, vol. 55, n. 5, 487-492, 1963.

_____. How a corn plant develops. **Special Reporter Iowa Agricultural Experimental Station**, v. 48, p. 4-15, 1966.

KUMUDINI, S.; TOLLENAAR, T. **Corn phenology**. University of Guelph, 1998. Disponível em:

<<http://www.plant.uoguelph.ca/research/homepages/ttollena/research/corn.html>> Acesso em: 10 jan. 2012.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2006. (Circular Técnica, n. 76). Disponível em:

<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/490408/1/Circ76.pdf>>. Acesso em: 2012.

MAGALHÃES, P. C. et al. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2002. 23 p. (Circular Técnica, n. 22).

NIELSEN, R. L. Kernel set scuttlebutt. **Corny News Network**, West Lafayette, IN. 2005.

Disponível em: <<http://www.kingcorn.org/news/articles.05/KernelSet-0809.html>>. Acesso em: 2012.

_____. A fast & accurate pregnancy test for corn. **Corny News Network**, West Lafayette, IN., 2007a. Disponível em: <<http://www.kingcorn.org/news/timeless/EarShake.html>>.

Acesso em: 10 jul. 2012.

_____. Ear size determination in corn. **Corny News Network**, West Lafayette, IN., 2007b. Disponível em: <<http://www.kingcorn.org/news/timeless/EarSize.html>>. Acesso em: 10 jul. 2012.

_____. Grain fill stages in corn. **Corny News Network**, West Lafayette, IN., 2007c.

Disponível em: <<http://www.kingcorn.org/news/timeless/GrainFill.html>>. Acesso em: 10 jul. 2012.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. **Special Bulletin**, Iowa, n. 48. 1993. Disponível em: <<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b->

online/library/maize/www.ag.iastate.edu/departments/agronomy/corngrows.html>. Acesso em: 2008. Tradução disponível em:
<[http://www.ipni.org.br/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/\\$FILE/Encarte103.pdf](http://www.ipni.org.br/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/$FILE/Encarte103.pdf)>. Acesso em: 2008.

2 RADIAÇÃO SOLAR

2.1 O MILHO COMO ESPÉCIE C₄

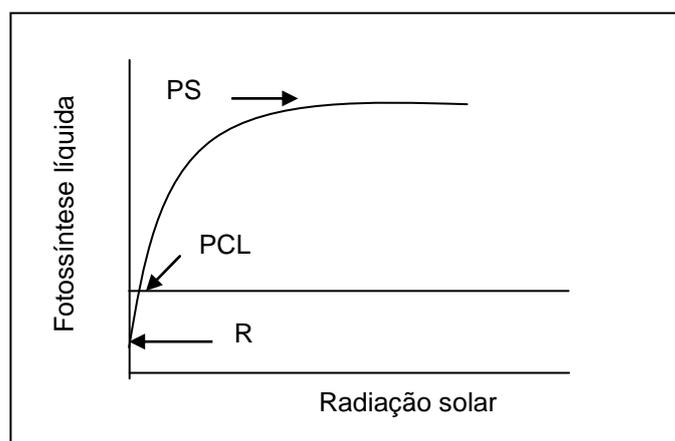
O milho é uma espécie com metabolismo fotossintético C₄, caracterizado por um mecanismo de concentração de CO₂ no sítio ativo da Ribulose-bifosfato-carboxilase-oxigenase (Rubisco) do ciclo de Calvin e Benson, que mantém alta razão CO₂ / O₂ e elimina a fotorrespiração (EHLERINGER; CERLING; HELLIKER, 1997). Este mecanismo de concentração se deve à ação da fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase) no citoplasma do mesofilo, que possui um K_m de 5 μmol para o CO₂, indicando alta afinidade por este gás. Inicialmente, o CO₂ atmosférico é fixado pela PEPcase, formando o ácido oxalacético. Em seguida, este produto de quatro átomos de carbono é transportado para as células da bainha vascular, onde é descarboxilado. Daí, o CO₂ é refixado pela Rubisco, que tem baixa afinidade pelo CO₂ (K_m de 20 a 30 μmol). Essa descarboxilação produz alta concentração de CO₂ e a Rubisco opera próximo à sua taxa máxima (saturação de CO₂), suprimindo sua atividade de oxigenase e eliminando a fotorrespiração (BERGONCI; BERGAMASCHI, 2002).

Dos três subgrupos de plantas C₄ classificados de acordo com a enzima descarboxilativa, o milho pertence àquele que apresenta a maior eficiência de uso da radiação solar ou eficiência quântica, com valor médio de 64,5 a 69 μmol mol⁻¹, enquanto outras C₄ apresentam valores em torno de 52,6 a 60,4 μmol mol⁻¹. Esta maior eficiência é atribuída à anatomia das plantas que possuem este mecanismo, qual seja: menor área entre as nervuras e lamela suberizada, que previne a perda de CO₂ para o meio (HATTERSLEY, 1984). Várias respostas do milho aos elementos meteorológicos decorrem de seu mecanismo fotossintético C₄, que resultam em alta produtividade e, em consequência, alto rendimento de grãos, superando outras espécies cultivadas. Estes conceitos são fundamentais, sobretudo quanto às interações da planta e o ambiente físico, com ênfase para radiação solar, CO₂, temperatura, água e nitrogênio (BERGONCI; BERGAMASCHI, 2002).

A curva clássica de resposta da fotossíntese à radiação solar é uma hipérbole não retangular (Figura 1). O intercepto ao eixo horizontal representa o ponto de compensação por radiação (fotossíntese líquida nula). O início da inclinação da curva corresponde à eficiência quântica, e o intercepto ao eixo vertical representa a respiração ao escuro (mitocondrial), quando a fotossíntese líquida é negativa. Com baixa radiação solar a taxa

de assimilação de carbono é limitada pela própria radiação. Sob alta radiação ocorre saturação, e a assimilação é limitada pela carboxilação, devido à baixa atividade enzimática. Por ser uma planta C₄, o milho praticamente não satura por radiação solar, pois o mecanismo de concentração de CO₂ provoca a saturação do mesmo no sítio da Rubisco, não permitindo limitação da carboxilação (BERGONCI; BERGAMASCHI, 2002).

Figura 1 – Fotossíntese líquida em função da radiação solar, sendo R a respiração ao escuro, PCL o ponto de compensação e PSL o ponto de saturação por radiação.



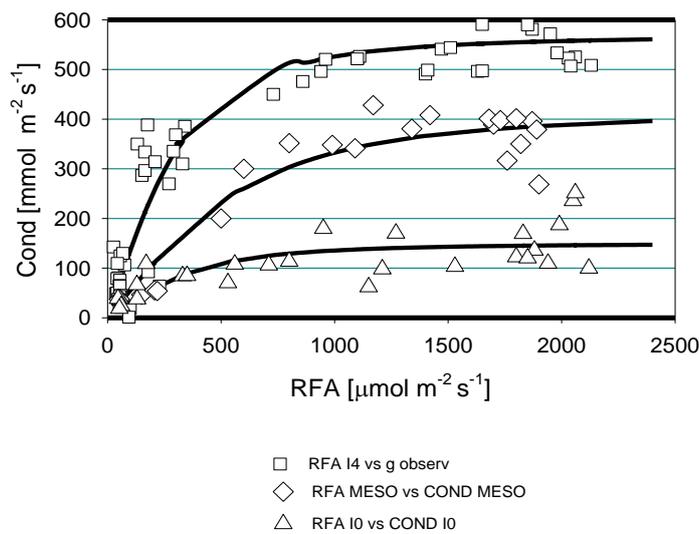
Fonte: BERGONCI; BERGAMASCHI, 2002.

Também são importantes as interações entre a radiação solar, o estado hídrico da planta e a condutância estomática. Em condições hídricas não limitantes há incremento na abertura estomática em resposta à radiação incidente, até um certo nível de saturação (Figura 2). Este aumento é linear até cerca de $500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de RFA incidente. Acima deste nível, diminui o incremento na condutância, com tendência de saturação a partir de aproximadamente $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A partir deste ponto não há mais resposta de abertura estomática ao aumento de RFA incidente. Em plantas sob déficit hídrico severo a função é crescente somente até $500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, com variação próxima a zero a partir deste nível de radiação. Situações intermediárias são observadas em plantas submetidas a condições de déficit hídrico mediano (BERGONCI; BERGAMASCHI, 2002).

Devido à anatomia e fisiologia das plantas C₄, suas respostas à concentração de CO₂ demonstram que as mesmas apresentam ponto de compensação de CO₂ entre 0 e $5 \mu\text{mol}$ de CO₂, o qual não é afetado pela concentração de oxigênio, diferentemente das plantas C₃ cujo ponto de compensação varia de 40 a $50 \mu\text{mol}$. Devido ao mecanismo de concentração de CO₂, nos níveis atuais de dióxido de carbono na troposfera ($350 \mu\text{mol}$

mol^{-1}) as plantas C_4 se encontram saturadas. Assim sendo, futuros aumentos nos níveis de CO_2 na atmosfera não deverão favorecer as plantas com metabolismo C_4 , como é o caso do milho (BERGONCI; BERGAMASCHI, 2002).

Figura 2 – Condutância estomática do milho, em função da radiação fotossinteticamente ativa incidente sem déficit hídrico (RFAI4), com déficit médio (RFAMESO) e alto déficit (RFAI0).



Fonte: SANTOS, 1998.

2.2 INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA CULTURA DO MILHO

Para Sans e Santana (2008) uma produção sustentável exige a análise das necessidades das culturas e um balanço com as ofertas ambientais. Neste contexto, verifica-se que a planta necessita captar energia da radiação solar, além de água e nutrientes, para manter o seu crescimento. Esses fatores são definidos basicamente por clima e solo; e são referidos como os mais importantes para o desenvolvimento das culturas e para a definição de sistemas de produção.

A produtividade de uma cultura é função da quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) absorvida pelas folhas e da eficiência com que estas convertem a energia radiante em energia química através do processo fotossintético. Por sua vez, a quantidade de radiação absorvida depende da eficiência com que a mesma é

interceptada. A eficiência de interceptação de RFA depende da área de captação de radiação no dossel vegetal (índice de área foliar) e da arquitetura foliar, que varia com o ângulo e formato das folhas (VARLET-GRANCHER et al., 1989).

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é a porção da radiação solar global (R_s) contida entre os comprimentos de onda de 300 e 700 nm. Sua variação é similar àquela da radiação global, ao longo do dia e ano. A razão entre RFA e R_s tem demonstrado pequenas diferenças, em função da nebulosidade, do ângulo de incidência ou detalhes de medição. No Brasil foram obtidos valores de RFA/ R_s da ordem de 0,42 (FRANÇA et al., 1997), 0,43 (PANDOLFO, 1995; CARDOSO et al., 2008), 0,46 (PEREIRA; MACHADO; CAMARGO, 1982) e 0,47 (ASSIS; MENDES, 1989).

A eficiência de interceptação de um dossel vegetal corresponde à capacidade que a população de plantas tem de interceptar a radiação solar incidente, a qual se constitui no principal fator que influencia a fotossíntese e a transpiração (THORPE, 1978). Porém, nem toda radiação solar interceptada é absorvida pelo dossel. Para milho, Gallo e Daughtry (1986) observaram que as diferenças entre radiação fotossinteticamente ativa interceptada e absorvida são menores que 3,5%. No Brasil, Müller e Bergamaschi (2005) observaram que 92% da radiação interceptada pelo milho é absorvida pelo dossel. Este coeficiente está dentro da faixa estimada por Varlet-Grancher et al. (1989), segundo o qual menos de 10 % da RFA_{int} não é absorvida pelo dossel.

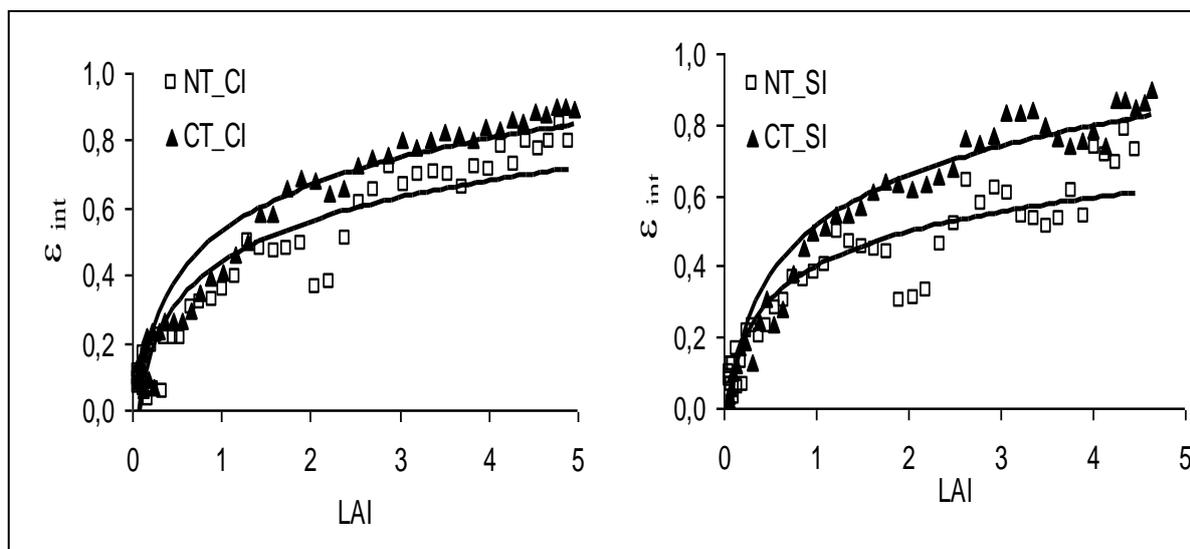
A eficiência de interceptação de radiação solar aumenta rapidamente no início do ciclo do milho, devido ao aumento no índice de área foliar (IAF). Porém, na medida em que IAF aumenta, há sombreamento crescente no interior do dossel, resultando em acréscimos menores na eficiência de interceptação (Figura 3). Müller e Bergamaschi (2005) observaram que quando o IAF do milho ultrapassa 2,7 a eficiência de interceptação de RFA tem aumentos decrescentes. A máxima eficiência de interceptação (em torno de 0,98) foi alcançada com IAF entre 5 e 6. Este padrão de variação se ajusta ao modelo exponencial de interceptação proposto por Monsi e Saeki (1953), modificado e utilizado por diversos autores, como Bonhomme et al. (1982) e Gosse et al. (1986).

Assim sendo, qualquer fator que afeta o crescimento da área foliar também interfere na eficiência de interceptação de RFA. Dentre eles, destacam-se o déficit hídrico, a deficiência de nitrogênio no solo e a densidade e arranjo de plantas na área (Figura 4). França, Bergamaschi e Rosa (1999) observaram que o déficit hídrico diminuiu o crescimento vegetativo do milho, reduzindo o índice de área foliar e a produção de matéria seca, aumentando a necessidade de graus-dia para completar o ciclo. Como conseqüência, a cultura teve sua eficiência de uso da radiação solar reduzida de 2,60

gramas de matéria seca por megajoule de RFA interceptada (sem déficit hídrico) para 1,44 g de matéria seca por megajoule de RFA interceptada, em condições de estiagem.

Para Sangoi e Silva (2006) a densidade e o arranjo de plantas são considerados fatores fundamentais para otimizar a exploração do ambiente pelo milho, já que permitem ajustar a cultura à disponibilidade de radiação solar da região ou da época de cultivo. A partir desta constatação, e pela necessidade de incrementar a eficiência de interceptação e a eficiência de uso da radiação solar, grande esforço tem sido feito em programas de melhoramento visando desenvolver genótipos adaptados a altas densidades populacionais. A seleção de híbridos para altas densidades tornou-os mais tolerantes a estresses, permitindo elevação da população de plantas, com incrementos na produtividade da cultura. Assim, a tendência é que a densidade de plantas aumente ainda mais nas lavouras de milho. Outras alterações no arranjo de plantas também são necessárias, como a redução do espaçamento entre linhas, para uma distribuição mais uniforme das plantas na área (Figura 4). Com isto, densidades altas e espaçamentos reduzidos fazem parte de um novo enfoque do arranjo de plantas na cultura do milho. Por outro lado, para que essas práticas de manejo possam incrementar o potencial produtivo da lavoura brasileira é fundamental que haja uniformidade na emergência e homogeneidade na distribuição das plantas nos sulcos de semeadura. Além disso, a disponibilidade hídrica, a fertilidade do solo e a adequação dos genótipos às condições da região produtora também são requisitos fundamentais para que as inovações no arranjo de plantas se traduzam em maior rendimento de grãos na colheita (SANGOI; SILVA, 2006).

Figura 3 – Eficiência de interceptação de RFA (ϵ_{int}) em função do índice de área foliar (LAI) de milho em plantio direto (NT) e preparo convencional (CT), com irrigação (CI) e sem irrigação (SI).



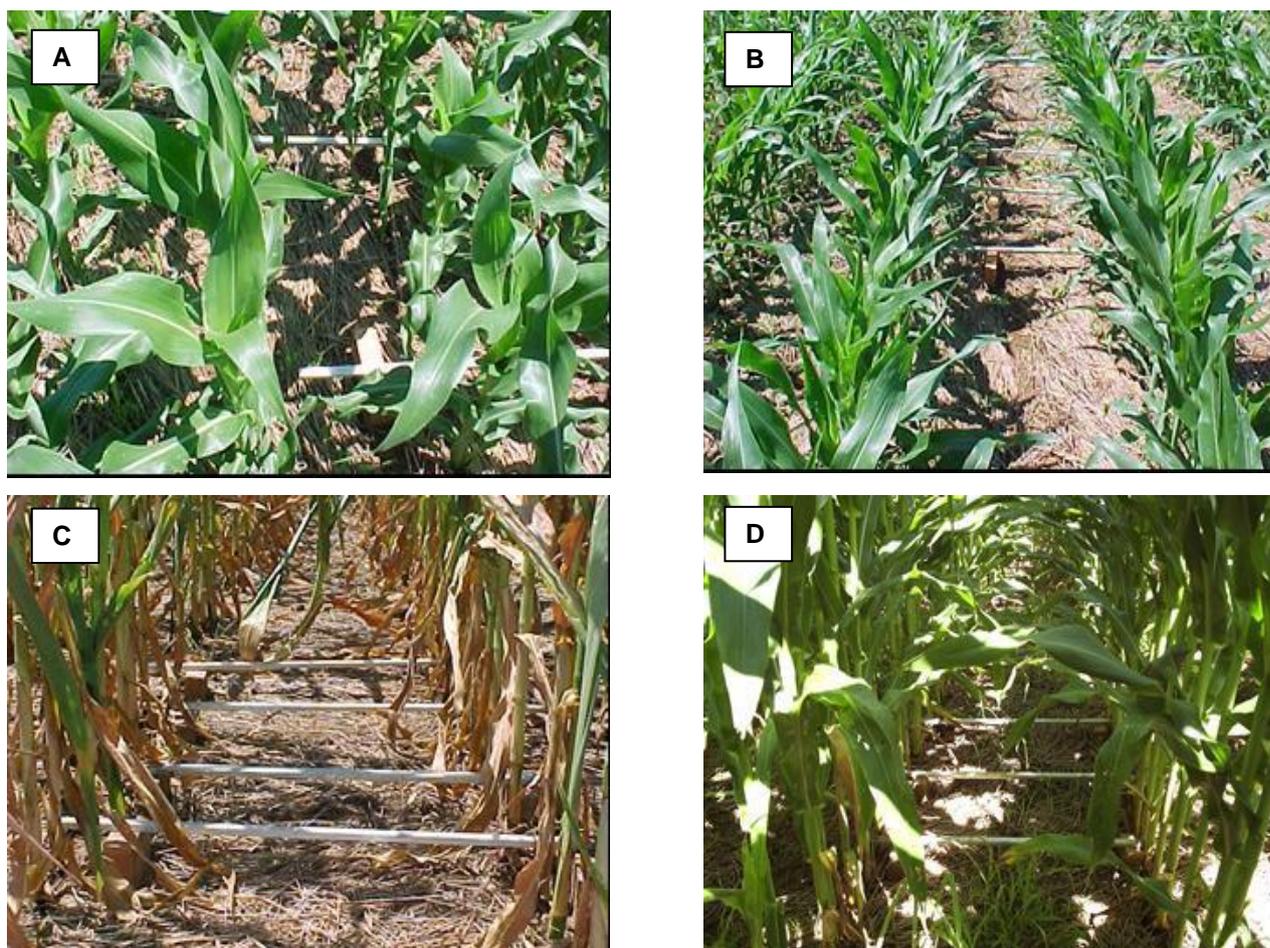
Fonte: BERGAMASCHI et al., 2004.

Para Strieder et al. (2008) a interceptação de radiação solar pelo dossel aumenta com a densidade de plantas, independentemente de espaçamento entre linhas, híbrido e estágio de desenvolvimento. Maiores índices de área foliar, obtidos com a redução do espaçamento entre linhas, potencializam maior sombreamento de folhas inferiores do dossel. O índice de área foliar e a interceptação de radiação solar pelo dossel variam com o espaçamento entre linhas, mas isso depende de densidade de plantas, tipo de planta, nível de manejo e estágio de desenvolvimento da planta. Em elevado nível de manejo, visando altos tetos de rendimento de grãos, menores espaçamentos entre linhas tendem a aumentar a senescência foliar, devido ao sombreamento, independente de densidade de plantas e do tipo de planta do híbrido (STRIEDER et al., 2008).

Trabalhos experimentais com diferentes combinações de densidade e arranjo de plantas demonstraram efeitos variáveis sobre o rendimento de grãos, dependendo da combinação de fatores. Em Goiás, Marchão et al. (2006) observaram que o adensamento proporcionado pelo incremento na densidade de semeadura do milho em espaçamento reduzido (0,45m) permitiu maior interceptação de RFA e maior rendimento de grãos. No Rio Grande do Sul, Kunz et al. (2007) também verificaram que a redução do espaçamento entre fileiras de milho aumentou a eficiência de interceptação. Porém, a eficiência de uso de RFA não diferiu entre espaçamentos e foi reduzida pelo déficit hídrico.

Além do índice de área foliar, o arranjo de plantas e a arquitetura de plantas podem alterar a eficiência de interceptação de radiação solar. A arquitetura foliar varia em diferentes genótipos, em função da forma e da inclinação das folhas, afetando o coeficiente de extinção (Figura 4). Isto faz com que haja diferenças na eficiência de interceptação de RFA para um mesmo IAF. As Figuras 4A e 4B demonstram alterações na eficiência de interceptação de RFA e, portanto, no coeficiente de extinção do dossel, causadas por diferenças no arranjo de plantas e na arquitetura foliar. Esta é uma característica de alguns genótipos modernos, que pode permitir o aumento da população de plantas devido à menor interceptação de radiação solar por unidade de área folia (menor coeficiente de extinção).

Figura 4 – Com baixo índice de área foliar a eficiência de interceptação de radiação solar do milho é baixa no início do ciclo (A e B). Espaçamentos amplos e folhas eretas diminuem a interceptação de radiação solar (B). O déficit hídrico pode causar senescência e enrolamento de folhas, diminuindo a interceptação de radiação solar (C). Com elevado IAF a interceptação de radiação é máxima em torno do florescimento (D).



Crédito: H. BERGAMASCHI, 2004.

Para uma população de 67 mil plantas por hectare, o coeficiente de extinção do milho estimado por Müller e Bergamaschi (2005) foi de 0,68, sendo próximo a 0,7 citado por Gosse et al. (1986). Em relação a coeficientes de extinção estimados pela eficiência de absorção, este corresponde ao limite inferior do intervalo de 0,68 a 0,73 referido por Varlet-Grancher et al. (1989) e semelhante aos valores de 0,65 e 0,66 obtidos por Gallo e Daughtry (1986) e Monteith (1996), respectivamente.

O coeficiente de extinção do milho é menor quando se considera a radiação solar global, ao invés de RFA. Baseados em recentes trabalhos experimentais Lindquist et al. (2005) obtiveram um valor médio de 0,49 para o coeficiente de extinção do milho, com base na radiação solar global.

Segundo Müller e Bergamaschi (2005), em cultivos de milho não irrigado o coeficiente de extinção é extremamente variável em função de outros fatores que não apenas o IAF, não se ajustando a uma função linear. Esta variabilidade pode ser atribuída ao enrolamento das folhas, quando a população de plantas está em deficiência hídrica, assim diminuindo a área foliar exposta à radiação solar e aumentando a radiação transmitida pelo dossel da cultura.

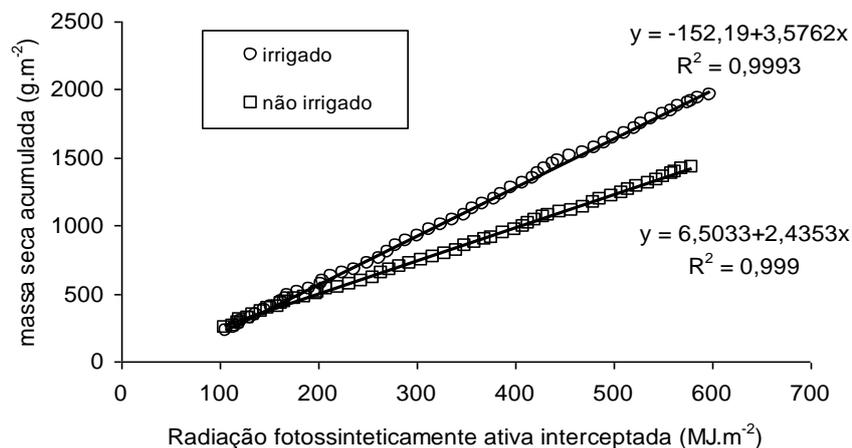
A eficiência de uso da radiação solar representa a razão entre a energia fixada na forma de biomassa das plantas e a energia incidente sobre o dossel. Em síntese, ela representa a eficiência da cultura na conversão da radiação solar através dos processos da fotossíntese. A eficiência de uso da radiação solar do milho aumenta, no início do ciclo, à medida que aumenta a eficiência de interceptação da radiação solar. Ela atinge um valor máximo no meio do ciclo, quando a cultura intercepta o máximo de energia, e diminui ao final do ciclo com a senescência foliar e diminuição da atividade fotossintética (MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005).

A eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa em milho irrigado, obtida por Müller e Bergamaschi (2005), foi de 3,27 g de matéria seca aérea por megajoule de RFA incidente, na média de todo o ciclo. Na mesma região, França, Bergamaschi e Rosa (1999) obteve eficiência de uso média de 2,59 g.MJ⁻¹ de RFA_{int} para todo o ciclo do milho. Durante os períodos de rápido crescimento, florescimento e parte do enchimento de grãos, em que as folhas tinham máxima capacidade fotossintética e máxima eficiência de interceptação de radiação solar, Müller e Bergamaschi (2005) obtiveram 3,58 g.MJ⁻¹ de RFA_{int}

(Figura 5). O déficit hídrico reduziu a eficiência de uso de RFA para 2,44 g.MJ⁻¹ de RFA_{int} no mesmo período. Diversas causas, dentre os quais a redução na condutância estomática (que reduz as trocas gasosas entre as folhas e o ar) e enrolamento e senescência foliar (que reduzem a interceptação de RFA – Figura 3) provocam redução na eficiência de uso de RFA quando o milho entra em déficit hídrico.

Avanços no melhoramento genético (sobretudo nas características de plantas) associados ao aprimoramento do manejo da cultura têm contribuído para aumentar a eficiência de uso da radiação solar pelo milho. Para modelos destinados a simular o acúmulo de biomassa da parte aérea do milho em condições de ótimo manejo, Lindquist et al. (2005) recomendam o uso de uma eficiência de uso de 3,8 g MJ⁻¹ de RFA absorvida. Este índice se baseou em experimentos conduzidos em alto nível de manejo nos EUA, nos quais foram obtidos valores semelhantes de biomassa acumulada àqueles obtidos no Brasil por Bergonci et al. (2001) e Muller e Bergamaschi (2005).

Figura 5 – Relação entre a matéria seca acumulada e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada em milho (Pioneer 3063), irrigado e não irrigado.



Fonte: MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, F.; N.de; MENDEZ, M.; E.; G. Relações entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 24, p.797-800, 1989.
- BERGAMASCHI, H. et al. Solar radiation intercepted by maize crops as function of soil tillage systems and water availabilities. In: INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANIZATION CONFERENCE, 13., 2004, Brisbane. **Proceedings**. Brisbane: International Erosion Control Association, 2004. p. 1-4.
- BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H. Ecofisiologia do milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis, SC : ABMS/EMBRAPA/EPAGRI, 2002. (CD-ROM).
- BERGONCI, J.I. et al. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 7, p. 949-956, 2001.
- BONHOMME, R. et al. Relations entre production de matière sèche aérienne et énergie interceptée chez différents géotypes de maïs. **C. R. Acad. Sci., Ser. 3 Sci. Vie.**, Paris, n. 294, p. 393-397, 1982.
- DALMAGO, G.A. **Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional**. 2004. 244 f. Tese (Doutorado)– Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- EHLERINGER, J. R.; CERLING, E.T.; HELLIKER, B. R. C₄ photosynthesis, atmospheric CO₂, and climate. **Oecologia**, Berlin, v.12, 112, p.285-299,1997.
- FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Modelagem do crescimento do milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.59-66, 1999.
- FRANÇA, S. et al. Radiação fotossinteticamente ativa e sua relação com a radiação solar global em dossel de alfafa, em função do índice de área foliar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 147-153, 1997.
- GALLO, K. P.; DAUGHTRY, C. S. T. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, p. 752-756, 1986.
- GOSSE, G. et al. Production maximal de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 6, p. 47-56, 1986.
- HATTERSLEY, P.W. Characterization of C₄ type leaf anatomy in grasses (Poaceae). Mesophyll: bundles sheath area ratios. **Annual of Botany**, Londres, v. 53, n.2, p.163-179, 1984.

- LINDQUIST, J.L. et al. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 72-78, 2005.
- MONSI, M.; SAEKI, T. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, Tokyo, v. 14, p. 22-52, 1953.
- MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 695-697, 1996.
- MÜLLER, A.G.; BERGAMASCHI, H. Eficiências de interceptação, absorção e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n.1, p. 27-33, 2005.
- PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C.; CAMARGO, M.B.P. Solar radiation regime in three cassava (*Manihot esculenta* Crantz) canopies. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 26, p. 1-10, 1982.
- SANGOI, L.; SILVA, P. R. F. Densidade e arranjo populacional em milho. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA, 8., 2006. **Anais...** Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/Densidade/Index.htm>. Acesso em: 26 jul. 2012.
- SANS, L.M.A.; SANTANA, D.P. Clima e Solo. In: CRUZ, J.C.; VERSANI, R.P.; FERREIRA, M.T.R. **Cultivo do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/35185/1/Clima-solo.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2012.
- SANTOS, A.O. **Simulação da perda d'água dos estratos ensolarado e sombreado de um dossel de milho (*Zea mays* L.), sob diferentes condições de disponibilidade hídrica**. 1998. 111 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- STRIEDER, M. L et al. Características de dossel e rendimento de milho em diferentes espaçamentos e sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 309-317, 2008.
- THORPE, M.R. Net radiation and transpiration of apple trees in rows. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 19, n. 1, 41-57, 1978.
- VARLET-GRANCHER, C. et al. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v. 9, p. 419-439, 1989.

3 TEMPERATURA E FOTOPERÍODO

3.1 NECESSIDADES TÉRMICAS E FOTOPERIÓDICAS DO MILHO

A adaptação climática de qualquer espécie vegetal tem estreita relação com seu padrão fenológico. Dela depende a distribuição geográfica de cada espécie e sua flutuação nos ecossistemas. Em cultivos agrícolas, o padrão fenológico é requisito fundamental para o zoneamento de cada espécie, visando indicação de regiões e épocas preferenciais. Para uma mesma espécie, o zoneamento se torna mais preciso ao considerar a variabilidade fenológica entre genótipos, que podem ser classificados por grupos de maturação. Este processo permite adequar as necessidades das plantas às disponibilidades do ambiente, em particular às condições climáticas. Neste caso, não se trata simplesmente da ocorrência, frequência e sobrevivência de indivíduos em diferentes ambientes. Trata-se, sobretudo, de explorar a potencialidade dos cultivos e manter a sustentabilidade dos sistemas de produção.

A temperatura do ar é um dos principais fatores determinantes da fenologia das plantas. Por isto, ela exerce papel fundamental na distribuição espaço-temporal das espécies. A interação das condições térmicas com a duração dos dias (fotoperíodo) também é considerada importante para inúmeras espécies cultivadas. O fotoperíodo exerce influência no ciclo de muitas espécies e este efeito é denominado fotoperiodismo. Em cultivos agrícolas o maior interesse do fotoperiodismo decorre, sobretudo, da indução ao florescimento, que interfere no crescimento das plantas e na duração do ciclo, para muitas espécies. Em diversas culturas (como a soja) o fotoperíodo pode ser fator determinante da distribuição regional de cultivares e do próprio calendário de cultivo.

Em milho o início do período reprodutivo se dá quando o meristema apical começa a se alongar e inicia o primórdio das flores do pendão (masculinas). Como nenhuma folha poderá formar-se após a diferenciação do meristema apical, a iniciação do primórdio floral determina o número máximo de folhas, nós e internós de cada colmo e, portanto, o tempo relativo entre a emergência e o final do período vegetativo. O número de nós formados antes da iniciação do pendão (portanto, o número de folhas) depende do genótipo, mas é modificado pela temperatura e o fotoperíodo (DUNCAN, 1976).

Segundo Chang (1974) a espécie *Zea mays* pode ser considerada fotoneutra (isto é, sem resposta ao fotoperíodo) ou de resposta a dias curtos. Ou seja, dependendo dos genótipos e das condições regionais (latitude e época), a fenologia do milho pode ser influenciada pelo fotoperíodo. Neste caso, em genótipos que respondem a dias curtos o encurtamento do fotoperíodo tende a reduzir as necessidades térmicas para a indução ao pendoamento.

Em experimentos na Austrália, Birch, Hammer e Rickert (1998) verificaram que o aumento do fotoperíodo pode prolongar o crescimento vegetativo (da emergência ao pendoamento) e aumentar o número de folhas. Este efeito se manifestou em genótipos adaptados ao trópico, quando foram semeados no final de verão daquele País. Por outro lado, Birch, Vos e Van der Putten, (2003) testaram genótipos de diferentes ciclos em maior latitude (na Holanda), incluindo um genótipo adaptado ao subtropical australiano, e confirmaram que o milho tem pequena ou nenhuma resposta ao fotoperíodo. Estes estudos demonstraram que a evolução da fenologia e formação de órgãos em plantas de milho (folhas, em particular) é função do tempo térmico, expresso por graus-dia acima de 8°C. O genótipo australiano manifestou a mesma necessidade térmica na Holanda e na Austrália, com fotoperíodo entre 12,5 e 16,5h. Houve diferenças no tempo térmico entre genótipos, por serem de diferentes grupos de maturação. Também houve maior necessidade de graus-dia nas primeiras épocas de semeadura, as quais foram atribuídas às baixas temperaturas ocorridas, em muitos casos abaixo da temperatura mínima basal, causando estresses por resfriamento (*chilling*) e retardando o desenvolvimento das plantas.

Sabe-se, porém, que a fenologia do milho é regulada basicamente pelo regime térmico, o que permite o emprego de modelos de crescimento baseados em somas térmicas. Inúmeros trabalhos demonstraram que os genótipos de milho cultivados nas diferentes regiões do Brasil necessitam determinada quantidade de energia para cumprir suas etapas fenológicas e o próprio ciclo. Assim sendo, para fins práticos e embora possa haver influências do fotoperíodo, o milho tem sido considerado uma espécie sem resposta ou de pouca resposta fotoperiódica. Portanto, o desenvolvimento da planta do milho depende, basicamente, das condições térmicas.

O uso da soma de graus-dia, baseada no acúmulo energético acima de determinada temperatura-base, é de uso abrangente em modelos que descrevem o desenvolvimento fenológico e o crescimento do milho. Dentro de um mesmo

grupo de maturação, é possível estimar a ocorrência de fases da cultura, para diferentes genótipos, regiões e épocas de cultivo, utilizando a temperatura do ar como única variável. Embora a radiação solar e a água também possam influenciar a fenologia do milho, a soma de graus-dia (temperatura do ar, portanto) tem relação linear com o desenvolvimento das plantas de milho (COELHO; DALE, 1980). A interação com outros fatores, como água, nitrogênio e o próprio fotoperíodo, pode provocar pequenas margens de erro, sob diferentes ambientes, mas o somatório de graus-dia tem sido um adequado parâmetro para estimar eventos fenológicos de milho. No trabalho clássico de Gilmore e Rogers (1958) o número de unidades de calor para o espigamento, acima de 10°C (designadas pelo autor como “graus efetivos”), permaneceu relativamente constante para diferentes épocas, enquanto os dias do calendário variaram amplamente. A partir daí, o critério de “tempo térmico” se tornou de uso crescente, substituindo o tempo cronológico (dias do calendário) pela redução na variabilidade entre ambientes diferentes. A predição de períodos críticos, datas da floração e maturação, a programação de práticas de manejo importantes e o emprego generalizado da modelagem são alguns exemplos de aplicações dos graus-dia em milho (DAUGHTRY; COCHRAN; HOLLINGER, 1984).

As condições térmicas influenciam os mais diversos processos vitais das plantas, desde germinação e emergência pela temperatura do solo, o desenvolvimento fenológico e o crescimento da planta como um todo, por ambas as temperaturas do solo e ar. Durante o período de crescimento vegetativo, o tempo térmico decorrido entre o aparecimento de duas folhas sucessivas é denominado “filocrono”. Este índice permite estimar a duração do período vegetativo das plantas e, portanto, a época de florescimento em função da temperatura do ar. No Estado de São Paulo, Tojo Soler, Sentelhas e Hoogenboom (2005) determinaram o filocrono de diversos híbridos de milho, considerando duas temperaturas-base: 8°C e 10°C. Verificaram que o aparecimento de cada folha necessitou cerca de 50 graus-dia até a décima segunda folha, diminuindo após. Isto demonstra que é possível fazer uma simulação precisa da fenologia do milho e da evolução do índice de área foliar no período vegetativo a partir do tempo térmico, devido à influência direta da temperatura no metabolismo das plantas e à alta correlação entre o número final de folhas e a duração do período vegetativo.

A lei de Van't Hoff aplicada ao crescimento vegetal sugere que a velocidade dos processos metabólicos duplica a cada 10°C de aumento da

temperatura. Porém, não é correto considerar que as plantas mantenham este padrão de resposta indefinidamente. Assim, o efeito da elevação da temperatura sobre o metabolismo das plantas não se expressa através de uma função linear contínua. Alguns estudos verificaram que modelos não lineares têm melhor desempenho em simular a fenologia do milho, tanto no período vegetativo como no reprodutivo. (BONHOMME, 2000; GUISTEM et al., 2001; STRECK et al., 2008).

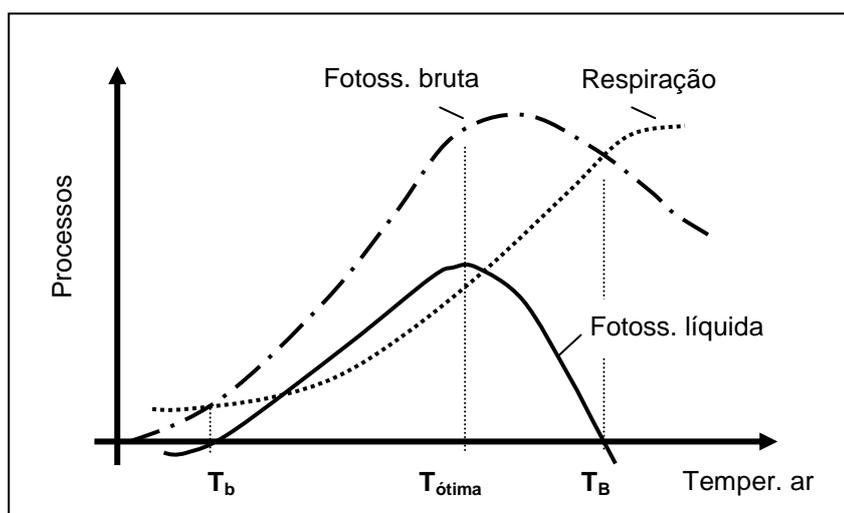
O método de graus-dia em milho apresenta outras limitações, como o efeito diferenciado da temperatura do ar ao longo do ciclo da cultura e diferenças de necessidades térmicas entre genótipos, sobretudo de temperaturas-base (DIDONET et al., 2008a, 2008b). Entretanto, mesmo admitindo as imperfeições do método e os possíveis efeitos das condições hídricas e do fotoperíodo, modelos lineares associando a fenologia do milho ao acúmulo de graus-dia tem sido amplamente testados e utilizados no Brasil (BERLATO; MATZENAUER; SUTILI, 1984; LOZADA; ANGELOCCI, 1999; GADIOLI et al., 2000; TOJO SOLER; SENTELHAS; HOOGENBOOM, 2005).

A Figura 6 demonstra, de uma forma genérica, como a temperatura influencia o metabolismo básico das plantas (BERGONCI; BERGAMASCHI, 2002). A fotossíntese líquida (assimilação líquida) tem aumento acentuado em baixas temperaturas, ocasionado por incrementos diferenciados nos processos de fotossíntese e respiração, atingindo um máximo na chamada temperatura ótima. Em temperaturas acima da ótima a assimilação líquida diminui, já que os gastos por respiração aumentam mais do que os ganhos pela fotossíntese. A fotossíntese líquida é positiva entre os dois extremos de adaptação da espécie ou cultivar, chamados temperatura base inferior (T_b) e temperatura base superior (T_B). Fora desses dois limites a assimilação líquida é negativa, sendo que as plantas paralisam seu crescimento e passam a sofrer estresse térmico.

A interpretação da Figura 6 serve como base para as relações de causa-efeito entre a temperatura do ar e o desenvolvimento das plantas (crescimento e fenologia). No período de germinação das sementes e emergência das plântulas a lógica é semelhante com relação à temperatura do solo, sendo que cada espécie tem seus limites de tolerância e uma faixa térmica ótima. O cálculo do acúmulo de graus-dia toma por base os limites térmicos de cada espécie ou genótipo, que são as chamadas temperaturas-base: inferior (T_b) e superior (T_B). Rigorosamente, o conceito de graus-dia deveria considerar ambos os limites térmicos e desprezar os

períodos em que a temperatura estiver abaixo de T_b e acima de T_B . Entretanto, na grande maioria dos trabalhos e modelos, o cálculo do tempo térmico leva em consideração somente o limite inferior (T_b), efetuando a soma de “temperaturas efetivas” (como alguns autores preferem), ou seja, a diferença entre a temperatura-base inferior e a temperatura média diária.

Figura 6 – Metabolismo das plantas e temperaturas cardeais: mínima basal ou base inferior (T_b), ótima ($T_{ótima}$) e máxima basal ou base superior (T_B).



Fonte: BERGONCI; BERGAMASCHI, 2002.

As temperaturas cardeais (ótima, base inferior e base superior) são mais elevadas em plantas de clima quente do que nas de clima frio. Dentro de uma mesma espécie, cultivares precoces têm suas temperaturas cardeais mais baixas que cultivares tardias. Esta diferença de resposta, adquirida através do melhoramento genético, permitiu que o milho pudesse ser cultivado em regiões de climas tão diferenciados. Também, tornou-se viável cultivar milho em regiões que eram consideradas inaptas por insuficiência térmica, como em planaltos das regiões Sul e Sudeste do Brasil. Do mesmo modo, o surgimento de genótipos mais precoces tornou possível a antecipação de épocas de cultivo no Sul do Brasil, assim como o cultivo em safrinha, ao final do verão e início de outono, sob temperaturas relativamente baixas.

Nas estimativas do acúmulo de graus-dia, é importante considerar as diferenças nas temperaturas cardeais entre os grupos de maturação. Diversos autores obtiveram melhores estimativas fazendo variar esses índices, de acordo

com o tipo de genótipo. Berlatto e Sutili (1976) obtiveram como melhores temperaturas mínimas basais 4°C em híbridos precoces, 6°C para os de ciclo médio e 8°C para tardios, pela classificação adotada na época. Porém, Kiriya (1991) considerou como limites extremos para a fenologia do milho 8°C e 44°C, sendo que o crescimento máximo ocorre entre 26 e 34°C. Para diversos genótipos da Austrália, Birch, Hammer e Rickert (1998) adotaram as seguintes temperaturas cardiais para cálculo de graus-dia: $T_b = 8^\circ\text{C}$, $T_{\text{ótima}} = 30^\circ\text{C}$ e $T_B = 40^\circ\text{C}$.

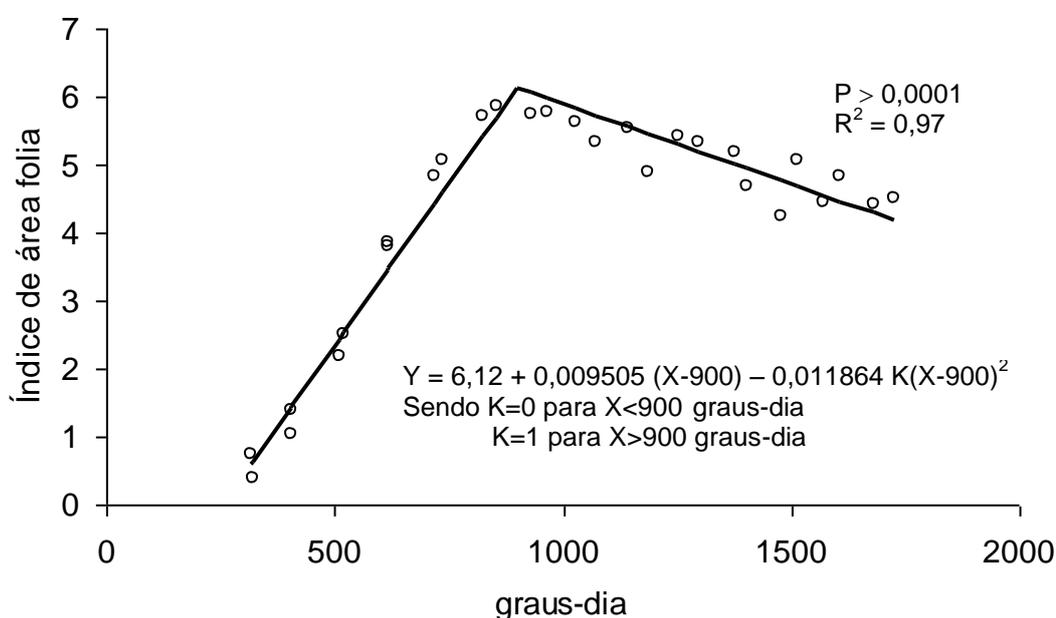
A classificação pela precocidade de genótipos através de denominações do tipo precoce, superprecoce, tardio, etc. é imprecisa para uso em grande escala. Ela depende de características genéticas, porém as interações genótipo-ambiente se alteram sempre que as condições do meio se modificam. Portanto, ela é relativa às condições do ambiente e, no caso particular do milho, as condições térmicas são aquelas que mais influenciam a duração das etapas fenológicas. Por este motivo, o ciclo de cada genótipo deveria ser caracterizado segundo suas necessidades de graus-dia, mas isto nem sempre ocorre. Em muitos casos, eles recebem classificação de precocidade na própria origem (superprecoce, precoce, normal, etc.) sem a devida comprovação experimental. Além disso, em geral, há grande demanda por híbridos mais precoces, para semeaduras antecipadas no final do inverno, em safrinha de fim de verão-outono ou para expansão de áreas em regiões de altitude. No sul do Brasil, o cultivo em safrinha teve incremento nas últimas décadas, em função da antecipação de cultivo na primavera ou para lavouras de milho em sucessão ao feijão de primavera ou fumo.

Visando estabelecer critérios para caracterizar genótipos de milho segundo grupos de precocidade, Fancelli e Dourado Neto (1997) citados por Gadioli et al. (2000) descreveram que híbridos tardios necessitam acima de 890 graus-dia para o florescimento, precoces necessitam mais de 831 e menos de 890 graus-dia, enquanto superprecoces necessitam menos de 830 graus-dia. Este procedimento é necessário, mas sua implantação em escala operacional necessita critérios científicos claros, além de suporte em pesquisas de campo.

Como a temperatura atua diretamente no metabolismo básico das plantas seu efeito se reflete, amplamente, sobre a evolução de uma cultura no campo. Assim, o acúmulo de graus-dia também pode ser empregado como parâmetro para estimar o crescimento do índice de área foliar (IAF), como demonstra a Figura 7. Baseado no modelo segmentado de Brisson et al. (1990), Müller et al. (2005) observaram que o crescimento do IAF do milho é linear entre o estágio de

quatro folhas expandidas e o final da expansão da folha bandeira, que corresponde à antese. No Rio Grande do Sul, um híbrido classificado como precoce necessitou aproximadamente 900 graus-dia (acima de 8°C) para atingir o máximo IAF, a partir da emergência das plantas. A partir do IAF máximo inicia-se uma lenta senescência de folhas até próximo à maturação fisiológica, com cerca de 1800 graus-dia após a emergência.

Figura 7 – Índice de área foliar de um híbrido precoce de milho em função de graus-dia acumulados após a emergência das plantas, na média de três anos. Eldorado do Sul, RS.



Fonte: MÜLLER et al, 2005.

A possibilidade de estabelecer modelos de crescimento do IAF a partir de uma única variável, de fácil obtenção como é a temperatura do ar, permite cumprir o primeiro passo importante da modelagem do crescimento e da formação do rendimento do milho. Uma vez calculado o IAF, é possível estimar a produção de biomassa da cultura em função da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel e, com o índice de colheita, projetar o rendimento potencial de grãos (FRANÇA, 1997; MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005).

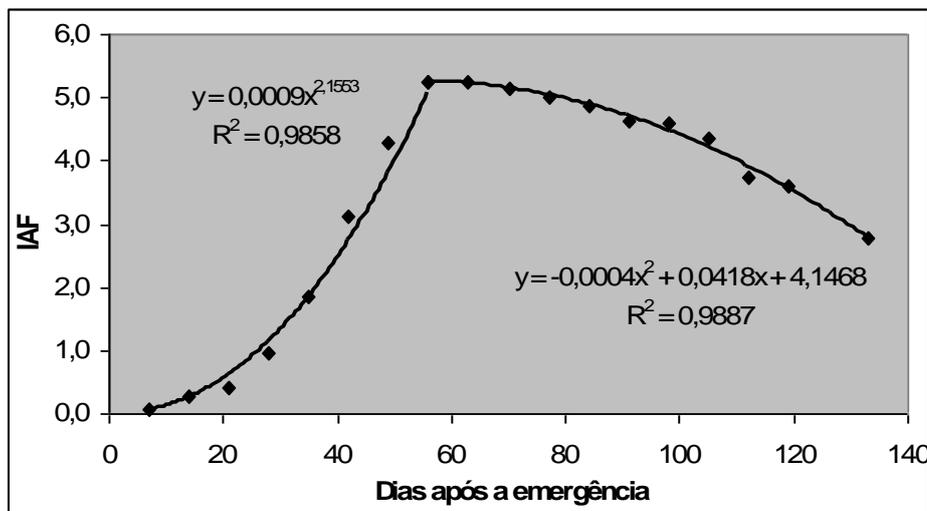
Funções lineares são de fácil aplicação, sobretudo ao serem inseridas em modelos complexos, como são os modelos analíticos ou determinísticos. A função

principal destes é a simulação dos principais processos que ocorrem ao longo do ciclo das culturas, e que resultam na produção de biomassa, de grãos ou frutos. Entretanto, em geral, os processos biológicos não seguem funções lineares. Suas respostas às condições do ambiente e a própria evolução dos fenômenos no tempo são, tipicamente, não lineares. Assim sendo, em geral, os modelos lineares representam simplificações dos processos biológicos. E isto se traduz em falhas na interpretação e nas aplicações dos princípios que regem as relações clima-planta, como o próprio uso de graus-dia para a simulação do desenvolvimento das plantas. (BONHOMME, 2000).

A Figura 8 representa a evolução do índice de área foliar de híbridos precoces de milho no Rio Grande do Sul, segundo Bergamaschi et al. (2006). A base de dados é aquela utilizada na Figura 7, porém com maior número de anos. O ajuste de um segmento exponencial para o crescimento vegetativo e um segmento quadrático a partir do máximo IAF permitiu abranger todo o ciclo das plantas, da emergência à maturação fisiológica. A ampliação de três para seis anos nos dados de origem também contribuiu para que houvesse alta precisão nos ajustes.

Por outro lado, o uso de número de dias do calendário como variável independente, ao invés do critério de tempo térmico, restringe a validade do modelo a ambientes com climas semelhantes àqueles em que os dados foram gerados. Embora tenham sido utilizados dados de seis anos, haverá discrepâncias de estimativas sempre que o modelo for utilizado em locais ou épocas com condições térmicas diferentes. Mesmo assim, o modelo não linear apresentado na Figura 3 se mostra coerente e lógico para simular a evolução do IAF no crescimento (até o florescimento) e seu lento declínio pela senescência gradual das folhas no período reprodutivo. O emprego de graus-dia acumulados após a emergência, ao invés de dias do calendário, poderia tornar o modelo de uso mais amplo, para híbridos e arranjos de plantas semelhantes àqueles utilizados por Bergamaschi et al. (2006).

Figura 8 – Modelos de estimativa do índice de área foliar (IAF) para híbridos precoces de milho, em função de dias após a emergência, tendo como ponto de separação o máximo IAF (aos 56 dias após a emergência), na média de seis anos.



Fonte: BERGAMASCHI et al, 2006.

3.2 POSSÍVEIS LIMITAÇÕES TÉRMICAS PARA MILHO NO BRASIL

No Brasil, o milho é cultivado em regiões tropicais e subtropicais, com pequenas expansões em zonas temperadas do Planalto Meridional. É uma das culturas com distribuição geográfica mais abrangente no País, e isto se deve ao fato de ser uma cultura anual de estação quente, com ampla variabilidade segundo sua precocidade. O intenso trabalho de melhoramento genético possibilitou a obtenção de genótipos de elevada precocidade, permitindo uma grande expansão do cultivo de milho em latitudes próximas a 50° no Hemisfério Norte e 45° no Hemisfério Sul. No Brasil, a cultura do milho está nas regiões mais frias da Região Sul, que não cultivavam o cereal até poucas décadas. Obviamente, nessas regiões frias o cultivo do milho se restringe a uma faixa estreita de semeadura e a genótipos mais precoces. Por outro lado, os mesmos genótipos superprecoces permitem a expansão de cultivo em lavouras semeadas ainda durante o inverno e em ciclo de verão-outono, nos cultivos de safrinha. Mesmo na Região Sul, isto está sendo feito como prática de escalonamento e diversificação de épocas, para reduzir (ou diluir) riscos por estiagens.

As limitações por baixas temperaturas podem ocorrer nas regiões mais frias e nas lavouras semeadas em épocas extremas, nas regiões Sul e Sudeste. O

ingresso de massas polares e ocorrência de geadas, sobretudo no final de inverno e início de primavera, é um risco provável e o zoneamento da cultura deve ser observado. Por outro lado, enquanto o ponto de crescimento das plantas estiver abaixo do solo (até em torno de V3) geadas, granizo e vendavais tem pequeno ou nenhum efeito sobre o rendimento final da lavoura. No entanto, a inundação pode causar danos irreversíveis, pela morte das plantas. Em V6 as geadas serão mais danosas (assim como o granizo e vendavais), pois as plantas têm seu ponto de crescimento acima do nível do solo (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).

Limitações por altas temperaturas são mais complexas e de difícil detecção, sobretudo quando estão associadas a déficit hídrico durante estiagens com elevada demanda evaporativa atmosférica. O déficit hídrico em milho leva ao enrolamento de folhas e fechamento de estômatos. A redução do fluxo transpiratório modifica o balanço energético das folhas e pode causar acúmulo de calor, com elevação da temperatura dos tecidos. Os danos podem ser parciais e reversíveis, mas podem causar senescência e morte de grande parte da área foliar. Durante o florescimento, a combinação de déficit hídrico e altas temperaturas diurnas afetam a polinização e a formação inicial dos grãos, resultando em diminuição do número de grãos por espiga. Noites quentes durante este período também podem reduzir o número de grãos, afetando a sobrevivência e desenvolvimento inicial dos grãos (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993; NIELSEN, 2005).

Em condições de temperaturas elevadas, as plantas C_4 apresentam taxa fotossintética maior que as espécies C_3 . Isto se explica, pois temperaturas elevadas afetam menos a fotossíntese de espécies como o milho, que têm metabolismo fotossintético C_4 e não apresentam fotorrespiração, a qual tende a aumentar com elevadas temperaturas em plantas com metabolismo C_3 . Por outro lado, altas temperaturas (sobretudo durante a noite) podem reduzir a assimilação líquida das plantas, devido ao aumento das perdas por respiração. Em regiões com verões quentes é frequente a redução do rendimento de grãos de milho em épocas tardias, devido a elevadas temperaturas. Trabalhando com diversos híbridos Gadioli et al. (2000) obtiveram maiores rendimentos de grãos em semeaduras de primavera e menores rendimentos em épocas posteriores, numa relação inversa entre produção de grãos e temperatura do ar. Brunini et al. (2006) também observaram que temperaturas noturnas elevadas podem prejudicar o desenvolvimento da cultura, embora a escolha de épocas apropriadas possa

permitir escape a essas condições, inclusive mitigando estresses térmicos no período diurno durante o florescimento.

Avaliando as prováveis limitações do milho no Estado de São Paulo, Brunini et al. (2006) observaram que, em algumas situações, temperaturas noturnas elevadas podem comprometer o rendimento de grãos do milho. Segundo os autores, mesmo em locais de média latitude os riscos de altas temperaturas no florescimento ou formação de espigas podem comprometer a formação de espigas e grãos e reduzir a produtividade. Por outro lado, o uso combinado de sistemas de informações geográficas com técnicas de embasamento agrometeorológico pode constituir medidas de mitigação do estresse ambiental na cultura do milho.

Cenários de mudanças climáticas se caracterizam, sobretudo por elevação das temperaturas noturnas. Com isto, é provável que haja impactos negativos sobre o potencial produtivo do milho, pelo que foi exposto. Por outro lado, embora não haja uma projeção segura quanto à ocorrência de geadas, a expansão de cultivo para regiões mais frias e a ampliação do calendário de cultivo nas zonas de produção são bastante prováveis. O encurtamento de ciclo pelo incremento no acúmulo de graus-dia também deverá ser considerado, em particular nos programas de melhoramento genético. Em resumo, a interação genótipo-ambiente deve ser continuamente revisada no sentido de adequar a cultura aos novos cenários de produção. Neste sentido, uma avaliação geral sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas na fenologia das plantas foi feita por Bergamaschi et al. (2006), tomando por base efeitos combinados das principais alterações climáticas, em futuros cenários.

REFERÊNCIAS

BERGAMASCHI, H. O clima como fator determinante da fenologia das plantas. In: REGO, G.M.; NEGRELLE, R.R.B.; MORELLATO, L.P.C. **Fenologia: ferramenta para conservação, melhoramento e manejo de recursos vegetais arbóreos**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2007. 1 CD-ROM.

BERGAMASCHI, H. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H. Ecofisiologia do milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, SC: ABMS/EMBRAPA/EPAGRI, 2002. 1 CD-ROM.

BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; SUTILI, V. R. Relação entre temperatura e o aparecimento de fases fenológicas do milho (*Zea mays* L.). **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 20, p. 111-132, 1984.

BERLATO, M. A.; SUTILI, V. R. Determinação das temperaturas bases dos subperíodos emergência-pendoamento e emergência-espigamento de três cultivares de milho (*Zea mays* L.). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 11., 1976, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba: Departamento de Genética da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1978. p. 523-27.

BIRCH, C.J.; HAMMER, G.L; RICKERT, K. J. Temperature and photoperiod sensitivity in five cultivars of maize (*Zea mays*) until tasseling initiation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, p. 93-107, 1998.

BIRCH, C. J., VOS, J.; VAN DER PUTTEN, P E. L. Plant development and leaf area production in contrasting cultivars of maize grown in a cool temperature environment in the field. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, vol.19, p. 173-188, 2003.

BONHOMME, R. Bases and limits to using "degree-days" units. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v.13, p.1-10, 2000.

BRISSON, N. et al. Proposition d'un modèle semi-deterministe pour la culture du maïs-grain: application a la C. E. E. et au territoire français. In: Commission des Communautés des Europeennes. **Evaluations des contraintes sol-climat sur la faisabilité des cultures: applications du maïs grains**. Paris: I.N.R.A. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, 1990.

BRUNINI, O. et al. Caracterizações macroclimáticas, agrometeorológicas e restrições ambientais para o cultivo de milho em regiões tropicais baixas. **InfoBibos**, Campinas, v.1, n. 3, 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/ambientemilho/index.html>. Acesso em: 2012.

CHANG, J. H. **Climate and agriculture: an ecological survey**. 3. ed. Chicago: Aldine Publishing Company, 1974. 301 p.

COELHO, D. T.; DALE, R. F. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: planting to silking. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 503-510, 1980.

DAUGHTRY, C. S. T.; COCHRAN, J. C.; HOLLINGER, S. E. Estimating silking and maturity dates of corn for large areas. Madison: **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 415-420, 1984.

DIDONET, A. D. et al. **Efeito de temperatura no desenvolvimento de milho**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, [2008a]. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/milho/tempmil.html>>. Acesso em: 2012.

_____. **Temperatura base para os subperíodos de desenvolvimento de híbridos de milho**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, [2008b]. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/milho/basemil.html>>. Acesso em: 2012.

DUNCAN, W. G. Maize. In: EVANS, L. T. **Crop physiology: some case histories**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 373 p.

FLESCHE, T. K. ; DALE R. F. A leaf index model for corn with moisture stress reductions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 1008-1014, 1987.

FRANÇA, S. **Modelagem de crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa, sob diferentes condições hídricas**. 1997. 70 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

GADIOLI, J. L. et al. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 3, p. 377-383, 2000.

GILMORE, E. C.; ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, p. 611-615, 1958.

GUISCHEM, J. M. et al. Crescimento e desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays* L.) em semeadura tardia e sua relação com graus-dia e radiação solar global. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 215-260, 2001.

KINIRY, J. R. Maize physics development. In: ASA-CSSA-SSSA. Modeling Plant and Soil systems. **Agronomy Monographs**, Madison, 31, p. 55-71, 1991.

LOZADA, B. I.; ANGELOCCI, L. R. Determinação da temperatura-base e de graus-dia para a estimativa da duração do subperíodo da semeadura à floração de um híbrido de milho (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 31-36, 1999.

MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H. Eficiências de interceptação, absorção e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n.1, p. 27-33, 2005.

MÜLLER, A. G. et al. Estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 65-71, 2005.

NIELSEN, R. L. Kernel Set Scuttlebutt. **Corny News Network**, West Lafayette, IN, 2005. Disponível em: <<http://www.kingcorn.org/news/articles.05/KernelSet-0809.html>>. Acesso em: 2012.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. **Special Bulletin**, Iowa, n. 48. 1993. Disponível em: <<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/library/maize/www.ag.iastate.edu/departments/agronomy/corngrows.html>>. Acesso em: 2008. Tradução disponível em: <[http://www.ipni.org.br/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/\\$FILE/Encarte103.pdf](http://www.ipni.org.br/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/$FILE/Encarte103.pdf)>. Acesso em: 2008.

STRECK, N. A. et al. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 4, p. 449-455, 2008.

TOJO SOLER, C. M.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Thermal time for phenological development of four maize hybrids grown off-season in a subtropical environment. Cambridge. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.143, p. 169-182, 2005.

4 DISPONIBILIDADE HÍDRICA

4.1 INTRODUÇÃO

O clima é o principal fator responsável pelas oscilações e frustrações das safras agrícolas no Brasil. Diversas análises da produção agrícola apontam alta correlação entre variações de safras das principais culturas e as condições meteorológicas e climáticas. Em geral, as condições hídricas são as que mais afetam a produção das lavouras. No caso específico do milho, a produção brasileira teve elevadas reduções nas safras de 1990/91, 1995/96, 1996/97, 1998/99, 1999/00, 2003/04, 2004/05 e 2011/12 devido à ocorrência de estiagens.

A região Nordeste do Brasil, por secas prolongadas, e as regiões Sul e Sudeste, por estiagens frequentes, têm grande variabilidade na produção agrícola. Sendo sensível ao déficit hídrico, o milho é uma das culturas mais afetadas pela variabilidade no regime pluviométrico.

Em algumas regiões, a frequência de anos secos chega a 20%. Entretanto, a produção de milho pode ser afetada drasticamente por estiagens curtas, se estas coincidirem com o período crítico da cultura. Por outro lado, os rendimentos de grãos podem ser elevados substancialmente, pela melhoria do manejo das lavouras, sobretudo pela redução das condições meteorológicas adversas. Isto quer dizer que o impacto das adversidades climáticas (em especial das estiagens) é intenso. Assim, o dimensionamento das necessidades de água para cada espécie e a análise das disponibilidades hídricas para as culturas são fundamentais para o entendimento das relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera, para o planejamento das lavouras, para a definição de melhores épocas de semeadura em cada região, para a elaboração de projetos de irrigação e para o aperfeiçoamento de zoneamentos agroclimáticos. Além disso, compreender as relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera é indispensável para quantificar os efeitos da disponibilidade de água sobre as plantas (inclusive pelo uso da modelagem) e elaborar indicações técnicas visando reduzir os prejuízos causados pelo déficit hídrico.

Para o planejamento da agricultura a quantificação da variabilidade e da frequência de condições climáticas limitantes é tão importante quanto o conhecimento das condições médias ou normais das variáveis meteorológicas.

Esses estudos só podem ser feitos com base em séries históricas de longo prazo de observações meteorológicas. No caso da precipitação pluvial, essas determinações são importantes na agricultura não irrigada, como subsídio às práticas de manejo de culturas que possam maximizar o aproveitamento da precipitação natural. Por outro lado, esses estudos também fornecem suporte indispensável para tomadas de decisão quanto às necessidades ou não de irrigação, o planejamento da agricultura irrigada como um todo e para que se possam quantificar as deficiências hídricas, não só em termos médios, mas em sua frequência de ocorrência em longo prazo (BERLATO, 1992).

4.2 NECESSIDADES HÍDRICAS DAS PLANTAS

No estudo das relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera é fundamental a quantificação das necessidades hídricas das culturas durante o ciclo de desenvolvimento. Ela é necessária ao planejamento e manejo da água nas lavouras, em programas de regionalização de cultivares, na estimativa de rendimento da cultura em regiões específicas, no zoneamento agroclimático e de risco climático e para definir práticas de manejo, visando o melhor aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis.

4.2.1 Evaporação, transpiração e evapotranspiração

Evaporação é o processo físico pelo qual a água passa do estado líquido para o estado gasoso. O fenômeno da evaporação envolve o suprimento de água, a mudança de fase da água e a saída de vapor d'água, em resposta a uma fonte de energia para o calor latente de evaporação, ao nível de superfície. A evaporação depende da energia disponível para a mudança do estado físico da água. Por isto, a radiação solar é o fator isolado mais importante.

A transpiração é a evaporação da água que passa através da planta. Ela ocorre, basicamente, na superfície das folhas. Por sua vez, a *evapotranspiração* (ET) é o processo combinado de perda de água numa área vegetada, resultante da evaporação na superfície do solo mais a transpiração das plantas. O processo de mudança de fase da água é essencialmente o mesmo, caso ocorra na superfície das plantas, do solo ou da água livremente exposta, seja acompanhado ou não por processo biológico. Portanto, não haveria necessidade da palavra

evapotranspiração para distingui-la do processo único de evaporação. No entanto, a maior parte da bibliografia sobre a perda de água em ecossistemas cultivados, principalmente no Brasil, adota o termo evapotranspiração, que também é utilizado neste texto.

Denomina-se *evapotranspiração máxima* de uma cultura (ET_m) aquela que ocorre ao longo de todo o ciclo das plantas, em condições adequadas de suprimento de água e demais práticas de manejo. Em sentido prático, ela representa o consumo ou a necessidade de água da cultura ao longo do ciclo, sem limitações de ambiente ou de manejo.

4.2.2 Determinação da evapotranspiração

A evapotranspiração de uma cultura pode ser determinada por meio de medições diretas ou através de estimativas. As medições diretas podem ser feitas utilizando-se, basicamente, dois procedimentos: os métodos baseados na equação do balanço hídrico e os métodos micrometeorológicos. Os primeiros se fundamentam no princípio da conservação de massa, para os quais são feitas medições sucessivas de umidade do solo ou em lisímetros (Figura 9). Entre os métodos micrometeorológicos, o balanço de energia tem sido utilizado com maior frequência. De maneira geral, a medição da evapotranspiração de culturas agrícolas ou vegetação de referência é feita em nível experimental, em função da necessidade de instrumentos e procedimentos específicos. Em geral, a ET medida se destina ao ajuste e aferição de métodos de estimativa em âmbito regional.

A *evapotranspiração de referência* (ET_o) expressa a perda de água de uma superfície coberta com uma vegetação de referência (em geral, gramado de porte baixo) sem limitação de suprimento de água e nutrientes. Ela pode ser estimada através de vários métodos descritos na literatura, baseados em princípios físico-fisiológicos, fórmulas empíricas, balanço de energia, ou mesmo através de relações com elementos meteorológicos. Berlato e Molion (1979) e Fontana (1992) descreveram diversos métodos destinados a estimar evapotranspiração máxima e de referência (ET_m e ET_o).

4.2.3 Relações entre evapotranspiração máxima e parâmetros meteorológicos

A evapotranspiração máxima de uma cultura (ET_m) em determinado local é função, basicamente, das condições meteorológicas durante o ciclo das plantas. Sem considerar a água armazenada nas plantas, ET_m representa o consumo de água da cultura. Naturalmente, as características de crescimento e desenvolvimento das plantas, que variam com o tipo e fertilidade do solo, época de semeadura, genótipo e práticas culturais, entre outros fatores, também influenciam o consumo de água da cultura. No entanto, a variabilidade da ET_m tem alta relação com a demanda evaporativa da atmosfera. Assim, valores de evapotranspiração máxima determinados em condições específicas de local, ano ou época de cultivo, não podem ser extrapolados para ambientes diferentes. Por outro lado, é possível estimar as necessidades hídricas da mesma cultura em diferentes ambientes através de relações entre sua ET_m e um parâmetro de referência, que pode ser um elemento meteorológico ou a evapotranspiração de referência. As relações mais encontradas na bibliografia utilizam a evaporação de tanque classe A, a evapotranspiração de referência e a radiação solar global.

Figura 9 – A evapotranspiração pode ser medida em lisímetros. Ela se compõe da evaporação na superfície do solo e da transpiração das plantas. O estado hídrico da planta pode ser expresso pelo potencial da água na folha e pela condutância estomática, e depende da extração de água pelas raízes e das perdas por transpiração.



Fonte: DALMAGO et al., 2003.

4.2.3.1 Relação entre ET_m e evapotranspiração de referência (ET_o)

Por definição, o coeficiente de cultura (K_c) é a razão entre a evapotranspiração máxima da cultura em estudo e a evapotranspiração de referência (DOORENBOS; PRUITT, 1975). Dentre as alternativas mais utilizadas para obter ET_o estão o método combinado de Penman e seus derivados. Os boletins da FAO elaborados por Doorenbos e Pruitt (1975) e Doorenbos e Kassam (1979) publicaram uma ampla compilação de dados de coeficientes de cultura (K_c) para inúmeras espécies, que têm sido amplamente utilizados, sobretudo, no planejamento e manejo da irrigação na agricultura.

Neste texto, a razão entre a evapotranspiração máxima (ET_m) de culturas e a evapotranspiração de referência (ET_o) é simbolizada por K_c , o qual pode ser utilizado para estimar o consumo de água das culturas, da seguinte forma:

$$\text{Obtenção do coeficiente: } ET_m/ET_o = K_c$$

$$\text{Estimativa da evapotranspiração máxima da cultura: } ET_m = K_c \cdot ET_o$$

4.2.3.2 Relação entre ET_m e evaporação de tanque classe A (E_o)

Uma das alternativas para estimar o consumo de água das culturas é a utilização de tanques de evaporação. Em estádios de vegetação ativa e sem deficiência de água, a evapotranspiração das culturas tem correlação positiva com a evaporação de uma superfície de água livre. Entre os instrumentos meteorológicos utilizados para estimar a evaporação de superfícies de água, o tanque de evaporação classe A (USWB) tem sido o mais utilizado.

A razão entre a evapotranspiração máxima (ET_m) de culturas e a evaporação de tanque classe A (E_o) possibilita a obtenção de um coeficiente (simbolizado aqui por K_{c_1}), que pode ser utilizado para estimar o consumo de água das culturas, da seguinte forma:

$$\text{Obtenção do coeficiente: } ET_m/E_o = K_{c_1}$$

$$\text{Estimativa da evapotranspiração máxima da cultura: } ET_m = K_{c_1} \cdot E_o$$

Para espécies anuais, Kc_1 depende da cobertura do solo pela cultura, aumentando da emergência ao máximo índice de área foliar e decrescendo após, até a maturação fisiológica.

No início do ciclo de uma cultura, quando a cobertura do solo é incompleta, a relação ET_m/E_o é baixa. Em cultivos em linha, a maior parte da água perdida nos estádios iniciais se dá basicamente pela evaporação na superfície do solo. Com o crescimento das plantas e da cobertura do solo, a evaporação da água do solo diminui, aumentando a transpiração e também a evapotranspiração. Quando o índice de área foliar (IAF) da cultura é máximo e a demanda evaporativa da atmosfera for elevada, a evapotranspiração da cultura é máxima.

4.2.3.3 Relação entre ET_m e radiação solar global (R_s)

A evaporação é um processo físico dependente da energia disponível no sistema, que é função do saldo do balanço de radiação (ou saldo de radiação, R_n). A evapotranspiração máxima tem alta correlação com o saldo de radiação, exceto em dias extremamente quentes e ventosos, devido ao efeito de advecção, ou em dias quentes e nublados com pouca radiação. Em dias com elevada advecção, a evapotranspiração pode exceder o saldo de radiação em até 30%. Em regiões úmidas, sem deficiência hídrica, mais de 80% do saldo de radiação é utilizado no processo de evapotranspiração. Por sua vez, o saldo de radiação é fortemente correlacionado à radiação global, que é um elemento meteorológico de mais fácil obtenção.

Desta forma, a relação entre a evapotranspiração máxima (ET_m) e a radiação solar global (R_s), possibilita obter um coeficiente, aqui simbolizado por Kc_2 , o qual pode ser utilizado para estimar o consumo de água das culturas, da seguinte forma:

$$\text{Obtenção do coeficiente: } ET_m/R_s = Kc_2$$

$$\text{Estimativa da evapotranspiração máxima da cultura: } ET_m = Kc_2 \cdot R_s$$

4.2.4 Ocorrência de déficit hídrico nas plantas

No solo, a água disponível às plantas se encontra entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A capacidade de campo representa a máxima quantidade de água que o solo consegue reter, após a drenagem do excesso por gravidade. O ponto de murcha permanente representa a quantidade de água no solo com a qual as plantas entram em estado de murcha e não readquirem a turgidez, mesmo em atmosfera saturada, a menos que o solo seja reumidificado. Os potenciais matriciais para esses limites são -0,01 MPa e -1,5 MPa, respectivamente (BERGAMASCHI, 1992).

Também na planta o potencial da água se torna menor (mais negativo) à medida que vai diminuindo seu conteúdo nos tecidos. Em geral, o potencial da água na planta é menor que no solo. No início da manhã, quando a planta está túrgida, o potencial da água nas folhas é da ordem de -0,1 a -0,3 MPa. Seu valor mínimo é atingido em torno das 14 h, pela redução do conteúdo de água da planta resultante do balanço entre o fluxo transpiratório e a quantidade de água que as raízes absorvem do solo. Valores de -0,5 a -1,5 MPa para o potencial da água na planta são típicos, em condições hídricas satisfatórias. Com baixa disponibilidade hídrica no solo e alta taxa de transpiração, o potencial da água na planta pode chegar a valores de -2 a -4 MPa (ou até menos), dependendo da espécie e do ambiente (BERGAMASCHI, 1992).

O potencial da água na atmosfera, assim como no solo e na planta, exprime a condição energética da água. As variáveis meteorológicas que determinam o potencial da água na atmosfera são a temperatura e a umidade relativa do ar. Os valores deste potencial são bem menores (mais negativos) que no solo e na planta, podendo atingir cerca de -100 MPa. A diferença de potencial entre a água da folha e do ar está diretamente relacionada aos elementos que determinam a demanda evaporativa da atmosfera. A demanda evaporativa da atmosfera é o fator que desencadeia o fluxo da água no sistema solo-planta-atmosfera e determina a quantidade de água que as plantas devem absorver, em função das características da cultura. A taxa de absorção de água é função da taxa de transpiração, da extensão e eficiência do sistema radicular e da disponibilidade de água no solo. O movimento da água do solo para a atmosfera, através da planta, é um processo contínuo e dinâmico que se dá ao longo de gradientes decrescentes de potencial.

A transpiração reduz o nível energético da água na planta, em um processo essencialmente passivo. Com isto, o fluxo de água do solo para as folhas é proporcional à diferença entre os potenciais da água na folha e no solo. A maior resistência ao fluxo da água na fase líquida está na planta. A resistência do solo ao fluxo de água torna-se significativa apenas quando o conteúdo de água no solo está próximo do ponto de murcha permanente. Resultados de pesquisa mostram que a resistência do solo contribui pouco para a resistência total da fase líquida e que, para condições de solo úmido, a resistência total e a resistência da planta podem ser consideradas iguais. No entanto, com a secagem do solo, a resistência total torna-se maior que a resistência da planta. Portanto, o crescimento vegetal é controlado diretamente pelo déficit hídrico na planta e, apenas, indiretamente pelo déficit hídrico no solo.

No sistema solo-planta-atmosfera a água se move de um potencial maior para um menor. Assim, quanto maior o gradiente de potencial mais rapidamente a água se escoia. O gradiente folha-ar representa a maior queda de potencial, sendo bem maior que todos os demais gradientes somados. É na passagem do vapor d'água para fora do mesófilo que se estabelece a maior diferença de potencial e também uma resistência maior que aquela do fluxo líquido ao longo do solo e da planta. Quando a água evapora no interior do mesófilo, diminui o potencial da água das células adjacentes à interface líquido-ar, e a água se move em sua direção. Como consequência do movimento da água através da planta, gradientes de potencial se desenvolvem ao longo de uma série de resistências, com maiores quedas onde o fluxo e as resistências são maiores. A redução do potencial determina a saída da água dos tecidos adjacentes aos vasos condutores, tais como o mesófilo, córtex e floema. Como resultado destas perdas, a deficiência se desenvolve nos tecidos das folhas, caules e raízes. Desta forma, o déficit de água é uma consequência inevitável do fluxo de água através da planta, ocorrendo sempre que a perda de água por transpiração excede a absorção pelas raízes. Mesmo em condições de equilíbrio dinâmico (*steady-state*), quando a absorção de água e a transpiração se equivalem, a diferença de potencial entre as folhas e o solo é necessária para manter o fluxo de água. Geralmente, plantas submetidas à transpiração intensa ficam sujeitas a um déficit de água. A defasagem entre a transpiração e a absorção de água é limitada pela capacidade de armazenagem de água da planta. Em geral, para plantas herbáceas ela é menor que 10% da transpiração diária, enquanto que para árvores pode representar 100%.

Com adequada disponibilidade hídrica e alta demanda evaporativa da atmosfera a taxa de transpiração é elevada. Porém, se a planta não consegue absorver água suficiente para repor as perdas por transpiração, ou seja, quando há desequilíbrio entre transpiração e absorção, o potencial da água na planta começa a diminuir. O déficit hídrico tem início e pode ou não causar estresse à planta, dependendo da intensidade do déficit. Portanto, o déficit hídrico na planta é um fenômeno quase diário que pode ocorrer mesmo em condições de alta disponibilidade de água no solo. Durante o dia, a planta perde mais água do que consegue absorver, até aproximadamente o meio da tarde. Após, com a diminuição da demanda evaporativa, a absorção de água pela planta torna-se maior que a perda por transpiração, iniciando-se a recuperação do déficit, até atingir o equilíbrio dos potenciais durante a noite. Se não houver reposição de água no solo pela precipitação pluvial ou irrigação, o estresse se tornará irreversível. Este processo depende da demanda evaporativa da atmosfera, da capacidade de armazenagem de água no solo, das características da cultura e do estágio de desenvolvimento da planta.

4.2.5 Efeitos do déficit hídrico

A redução no rendimento das culturas causada por déficit hídrico e o aumento de rendimento devido à suplementação de água pela irrigação, são questões de natureza prática e de grande interesse aos pesquisadores, extensionistas e produtores rurais.

As necessidades hídricas das culturas e a sensibilidade ao déficit hídrico variam ao longo do ciclo (Figura 10). A quantidade de água que uma cultura consome durante seu ciclo sem restrições hídricas no solo (ET_m) depende, basicamente, das condições que determinam a demanda evaporativa da atmosfera e das características da cultura. Os principais fatores da planta que influem na evapotranspiração de comunidades vegetais são: espécie vegetal, reflexão de luz pelas plantas, espaçamento e orientação das filas, estatura de planta, profundidade e extensão do sistema radicular, estágio de desenvolvimento e índice de área foliar. Em culturas anuais a evapotranspiração é proporcional à área foliar antes que haja auto-sombreamento das folhas. Por isto, pode haver grandes variações na ET_m, dependendo do estágio de desenvolvimento em que se encontram as plantas.

Matzenauer (1980) obteve valores de ET_m de milho irrigado menores no início do desenvolvimento das plantas, com um gradual aumento durante o crescimento vegetativo, atingindo valores máximos durante a floração e início de enchimento de grãos, decrescendo, após, até a maturação fisiológica. O subperíodo da cultura do milho em que o consumo de água é máximo vai do pendoamento ao espigamento.

O déficit hídrico afeta praticamente todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento das plantas, reduzindo a área foliar, diminuindo a fotossíntese e afetando vários outros processos, além de alterar o ambiente físico das culturas, por modificar o balanço de energia do sistema (BERGAMASCHI, 1992). Os efeitos causados pelo déficit hídrico são devidos a modificações na anatomia, morfologia, fisiologia e bioquímica das plantas. Com a redução na taxa de evapotranspiração, parte da energia que seria consumida neste processo é utilizada em outros processos, como o aquecimento do solo, aquecimento do ar e do sistema como um todo, aumentando a temperatura e diminuindo a umidade relativa do ar. Assim, em uma cultura submetida a um déficit hídrico haverá maior demanda evaporativa do ar junto às plantas, conduzindo as mesmas a estresse mais rápido e intenso.

O aumento na resistência da folha à difusão de vapor resulta na elevação da sua temperatura, já que o fluxo de calor latente é reduzido e o calor sensível aumenta. Diversos trabalhos demonstraram que culturas submetidas a déficit hídrico apresentam temperatura da folha superior à do ar. Por isto, a diferença de temperatura folha-ar pode ser utilizada para indicar o estado de estresse hídrico das plantas, podendo ser relacionada com o rendimento. Bergonci et al. (1999) observaram diferenças na temperatura do dossel-ar de até 6°C entre parcelas de milho irrigado e não irrigado entre as 10 e 14h, que constitui um indicador confiável de déficit hídrico.

Figura 10 – No início do ciclo a evaporação na superfície do solo é elevada e a transpiração das plantas é reduzida (esquerda). O crescimento da área foliar aumenta a transpiração e reduz a evaporação na superfície do solo, devido ao sombreamento (direita).



Crédito: H. BERGAMASCHI, 2004.

Uma das conseqüências imediatas do déficit hídrico é a diminuição da expansão celular, que causa redução da área foliar. A redução na área foliar causa decréscimo da taxa de crescimento da planta, especialmente durante os estádios iniciais de crescimento e, em conseqüência, menor interceptação da radiação solar. França, Bergamaschi e Rosa (1999) observaram que o déficit hídrico afetou negativamente o índice de área foliar e o acúmulo de matéria seca nas plantas de milho. Como a eficiência de interceptação de radiação depende do índice de área foliar, em períodos de estiagens a captura da radiação solar incidente é reduzida pela redução da área foliar, além da murcha e enrolamento das folhas. Este efeito do déficit hídrico sobre a área foliar é de caráter permanente sendo que, no caso de espécies de hábito de crescimento determinado, não há possibilidade de compensação por aumento do número de folhas.

4.2.6 Período crítico do milho

O conhecimento dos períodos críticos no ciclo das culturas, quando há máxima sensibilidade ao estresse ambiental e maior resposta à disponibilidade hídrica no solo, possibilita a adoção de importantes práticas de manejo para otimizar o uso da água na agricultura. Portanto, a irrigação deve ser feita

prioritariamente durante o período crítico das culturas, quando haverá maior eficiência da suplementação hídrica.

Os efeitos do déficit hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento sobre o crescimento e rendimento das culturas, geralmente, tem sido estudados empiricamente. Diversos estudos relatam que, embora não tenha sido observada uma resposta diferencial à água nos vários estádios de crescimento em todas as plantas, existem consideráveis evidências de que a maioria das plantas de hábito determinado é mais sensível ao déficit hídrico durante a iniciação floral, a floração e o desenvolvimento inicial de frutos e grãos. Os mesmos trabalhos também indicam que cada órgão e cada processo fisiológico da planta podem responder diferentemente ao aumento do déficit hídrico.

Matzenauer, Westphalen, Maluf (1986) verificaram uma redução de 51% no rendimento de grãos quando ocorreu deficiência hídrica durante o período reprodutivo do milho. Os autores estudaram o efeito da irrigação em diferentes períodos sobre o rendimento de grãos da cultura, na Depressão Central do Rio Grande do Sul, e concluíram que o período em que a irrigação apresenta maior efeito sobre o rendimento de grãos é o reprodutivo. Dentro do período reprodutivo, o subperíodo pendramento-espigamento é o que apresenta maior sensibilidade ao déficit hídrico, seguido do início de enchimento de grãos. Bergonci et al. (2001) confirmaram este subperíodo como o mais sensível para déficit hídrico, quando a eficiência da irrigação para rendimento de grãos é mais elevada.

A partir de resultados de campo, em condições pluviométricas contrastantes, Bergamaschi et al. (2004a) verificaram que o milho tem elevada sensibilidade ao déficit hídrico do florescimento ao início de formação de grãos (Figura 11). Condições hídricas adequadas neste período podem garantir produtividade de grãos em níveis elevados, da ordem de 8.000 kg ha⁻¹, se não houver outras limitações de manejo. A alta sensibilidade da cultura em um período tão curto, associada à grande variabilidade na distribuição de chuvas durante a estação quente, faz do milho uma cultura altamente suscetível ao fator água. Isto se traduz em alto risco ao produtor, mesmo que a tendência da safra seja de chuvas acima da condição climática média, como em anos de El Niño. Em anos de estiagem, a cultura poderá ter desempenho adequado, em algumas épocas, desde que haja água disponível no período crítico. Desta forma, a irrigação apenas neste período poderá garantir produtividade satisfatória, mesmo que a cultura sofra restrições no restante do ciclo (MATZENAUER, 1994; BERGONCI et

al., 2001). Assim, a irrigação na cultura do milho, ao invés de representar a aplicação de grandes quantidades de água, significa atender à necessidade hídrica do período crítico. A quantidade de água necessária para obter adequada produtividade não é elevada, o que pode ser relevante em pequenas propriedades, principalmente naquelas com restrições em termos de mananciais ou equipamento disponível.

O déficit hídrico durante o crescimento vegetativo reduz a área foliar, o teor de clorofila nas folhas, a interceptação de radiação solar, a condutância estomática e a taxa fotossintética, mas os danos são reversíveis (Figura 11). Por outro lado, durante o período crítico do milho o déficit hídrico afeta, principalmente, o número de espigas por planta e o número de grãos por espiga, além dos efeitos citados (BERGAMASCHI et al., 2004a). De acordo com Herrero e Johnson (1981), o déficit hídrico parece afetar, principalmente, o desenvolvimento dos órgãos florais masculinos, bem como a germinação do pólen. Segundo Schussler e Westgate (1991) a redução do número de grãos por espiga, em plantas submetidas a déficit hídrico, se deve à baixa taxa de suprimento de assimilados aos ovários, provocando aborto de grãos.

Com dados obtidos em 27 condições hídricas variáveis, Bergamaschi et al. (2006) ajustaram modelos de regressão relacionando o rendimento de grãos do milho com o déficit hídrico e com a razão entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima (E_{Tr}/E_{Tm}) para o Rio Grande do Sul. Verificou-se que a maior redução na produção ocorreu em consequência do déficit hídrico durante o período que engloba a polinização, formação do zigoto e desenvolvimento inicial do grão, numa relação quadrática. Para este intervalo do ciclo, a razão E_{Tr}/E_{Tm} explicou quase 80% das variações na produção de grãos, a qual se estabiliza acima de uma razão de 0,7. O estudo abrangeu 10 anos de experimentação de campo e demonstrou que a irrigação aumenta e estabiliza a produção do milho nesse Estado. Por outro lado, os resultados evidenciaram que a maior eficiência de uso da irrigação em milho corresponde a doses de rega em torno de 60% daquela necessária para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo.

Figura 11 – Déficit hídrico no período vegetativo (esquerda) reduz a área foliar, o teor de clorofila nas folhas, a interceptação de radiação solar, a condutância estomática e a taxa fotossintética, mas os danos são reversíveis. Do pendoamento ao início de formação de grãos (direita) os danos são maiores e irreversíveis ao rendimento de grãos, pois o número de espigas por planta e grãos por espiga são afetados diretamente (direita).



Crédito: H. BERGAMASCHI; G. A. DALMAGO, 2004.

Este conjunto de dados contém diversos parâmetros fundamentais para aplicações importantes como zoneamentos agroclimáticos, manejo da água na cultura (inclusive irrigação) e planejamento geral de lavouras e propriedades, visando minimizar riscos por estiagens e a sustentabilidade dos sistemas de produção. A modelagem de lavouras também necessita parâmetros de resposta das plantas às condições do meio físico, para simulação de crescimento das plantas e rendimento final de grãos. Os mesmos têm ampla aplicação, desde diagnósticos de safras até sistemas de tomada de decisões em monitoramento e manejo de cultivos. Os resultados de Bergamaschi et al. (2004a) e Bergamaschi et al. (2006) reafirmam a idéia de que a quantidade de água a ser aplicada não é o principal fator a ser observado no manejo da irrigação. O uso adequado da irrigação deve considerar, sobretudo, o momento em que a planta mais necessita de água (período crítico), a fim de se obter maior eficiência de uso da água e demais insumos. É indispensável considerar esses aspectos na implantação de sistemas de monitoramento eficientes, a fim de manejar a cultura dentro do conceito de precisão na agricultura, alocando recursos de produção, como a água, no momento em que as plantas mais necessitam.

4.2.7 Relação entre o rendimento de grãos e condições pluviométricas

Os primeiros trabalhos relacionando a produção de matéria seca com a quantidade de água transpirada foram realizados no início do Século XX. Foi observada uma relação linear entre as duas variáveis para diversas culturas, utilizando diferentes cultivares. A estreita relação entre produção de matéria seca e transpiração pode ser explicada pelo fato de que o saldo de radiação, que é causa principal da transpiração, e a radiação solar que determina a fotossíntese têm uma relação linear. Por sua vez, os processos de fotossíntese e transpiração são altamente correlacionados. A fotossíntese é afetada pelo déficit hídrico devido ao fechamento dos estômatos e à redução da área foliar. O fechamento dos estômatos limita o fluxo de CO₂ para o interior da folha, ao mesmo tempo em que restringe o fluxo de água da folha para a atmosfera, diminuindo a transpiração.

Bergamaschi et al. (1989) e Berlato (1992) relacionaram baixos rendimentos médios da soja, nas principais regiões produtoras do Brasil, com deficiências hídricas durante o ciclo da cultura. No Rio Grande do Sul, em anos muito secos (1978/79, 1985/86, 1987/88 e 1990/91), os rendimentos médios estiveram abaixo de 1.000 kg ha⁻¹. Para milho também ficou demonstrada a dependência do rendimento de grãos ao regime hídrico durante o ciclo da cultura. No ano agrícola 1990/91 (muito seco) o rendimento médio no Estado foi de 1.100 kg ha⁻¹, enquanto que no ano seguinte (1991/92), com maior quantidade e melhor distribuição de chuvas, o rendimento médio atingiu 2.700 kg ha⁻¹. Esta análise, embora superficial e considerando apenas o fator hídrico, numa escala espacial ampla, mostra a importância da precipitação pluvial para o rendimento das culturas de primavera-verão, principalmente milho e soja. Neste sentido, alguns pesquisadores estudaram a relação entre o rendimento de grãos e a disponibilidade hídrica utilizando variáveis originais ou derivadas.

Matzenauer e Fontana (1987) estudaram a relação entre o rendimento de grãos de milho e a altura de chuva em diferentes períodos do ciclo, para o Rio Grande do Sul, através da análise de regressão. Os períodos em que as variáveis apresentaram melhor ajuste foram do pendoamento a 30 dias após e de uma semana antes do pendoamento a uma semana após o final do espigamento, com coeficientes de determinação de 0,785 e 0,763, respectivamente. A associação entre essas variáveis também foi muito significativa nos períodos de 30 dias após a emergência ao pendoamento, pendoamento à maturação fisiológica e no ciclo

completo (emergência à maturação fisiológica). Os autores concluíram que a chuva exerce grande influência no rendimento de grãos da cultura do milho, principalmente durante a floração e enchimento de grãos. Aginsky (1991) fez uma ampla análise da relação entre o rendimento de grãos de milho e a precipitação efetiva, para diversas localidades do Rio Grande do Sul, concluindo que o rendimento do milho é linearmente dependente do volume de água disponível e que a distribuição da precipitação é mais importante do que o total.

Medeiros et al. (1991) relacionaram o rendimento relativo de grãos de milho durante vários anos, com o índice E_{Tr}/E_{Tm} (razão entre evapotranspiração real e evapotranspiração máxima), em sete subperíodos e no ciclo da cultura, no Rio Grande do Sul. O subperíodo em que as variáveis melhor se ajustaram foi de 10 dias antes do pendoamento a 10 dias após o final do espigamento, englobando a floração e o início de enchimento de grãos. Para este mesmo subperíodo, Bergonci et al. (2001) obtiveram uma resposta quadrática entre o rendimento de grãos de milho e a lâmina de água aplicada por irrigação. Com doses de rega próximas a 80% daquela necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, os rendimentos tenderam a se nivelar junto aos valores máximos, com os maiores níveis de eficiência da água aplicada.

Em trabalho realizado com milho em quatro locais, Matzenauer et al. (1995a) encontraram alta associação entre rendimento de grãos e evapotranspiração relativa (E_{Tr}/E_{Tm}), estabelecendo modelos de previsão do rendimento a partir do índice utilizado. No teste de validação dos modelos, os coeficientes de determinação obtidos foram próximos de 0,90, demonstrando a elevada dependência da cultura à disponibilidade hídrica no solo.

Hillel e Guron (1973) encontraram relação linear entre o rendimento de grãos de milho e a evapotranspiração total. Observaram, no entanto, que a função não começava na origem, ou seja, mesmo com determinado valor de evapotranspiração o rendimento foi zero. Este valor de evapotranspiração, segundo os autores, pode ser devido à evaporação na superfície do solo. Outros pesquisadores também citam valores negativos para o intercepto da função linear entre rendimento de grãos e evapotranspiração real, sendo que o valor de evapotranspiração observado para rendimento nulo é uma aproximação da quantidade de água evaporada na superfície do solo.

Através de análises de regressão, Bergamaschi et al. (2007) estabeleceram relações entre o rendimento do milho no Rio Grande do Sul e na

principal região produtora do Estado com a precipitação pluvial ocorrida para períodos de 30 dias imediatamente após o pendoamento e de 45 dias, sendo este contado a partir de 5 dias antes do pendoamento. Os resultados indicaram relações assintóticas, demonstrando que os rendimentos estabilizam quando a precipitação totaliza cerca de 200mm, do pendoamento a 30 dias após, e aproximadamente 300mm no período de 45 dias, a partir de 5 dias antes do pendoamento. Estas relações podem ter caráter de previsão, considerando que é possível estabelecer uma relação de causa-efeito para fins de avaliação de safras, antes que as lavouras atinjam o final do ciclo. Os totais de precipitação necessários para estabilizar os rendimentos de lavoura são coerentes com as necessidades de água do milho no Estado, durante o período de maior demanda de água (entre 6 e 7 mm diários), como será visto a seguir. Também, eles indicam que o total de precipitação necessária para atender à demanda do milho durante seu período crítico é próximo a 200mm mensais. Ou seja, regiões cujas normais de precipitação são inferiores a este nível apresentam riscos de oscilação de rendimentos por insuficiência pluviométrica. Em geral, a variabilidade das chuvas de verão é elevada e períodos de estiagens têm maior demanda evaporativa, o que eleva os riscos por déficit hídrico.

Considerando uma série de 10 anos consecutivos de dados experimentais, a Figura 12 demonstra a variabilidade nos rendimentos de grãos do milho entre anos, na região subtropical do Rio Grande do Sul. Considerando a média entre os rendimentos com e sem irrigação, pode-se verificar que há uma perda de mais de 40% no rendimento médio. O rendimento médio sem irrigação, porém sem limitação de outros fatores, foi de 6.000 Kg ha⁻¹. Esta média pode ser considerada como razoável, porém a grande variabilidade demonstra o grande risco que as condições pluviométricas da região impõe aos agricultores. No mesmo trabalho, Bergamaschi et al. (2004b) demonstraram que o uso de irrigação em milho é economicamente vantajoso na Depressão Central do Rio Grande do Sul, comprovando as limitações apontadas pelo zoneamento climático da cultura.

Bergamaschi e Dalmago (2006, 2007) fizeram uma análise conjuntural do uso da irrigação em milho no Brasil, incluindo o plantio direto para aumentar a armazenagem de água no solo e reduzir perdas por escoamento de água na superfície. Os autores concluíram que, em geral, o plantio direto favorece o uso da irrigação e favorece o sistema produtivo como um todo.

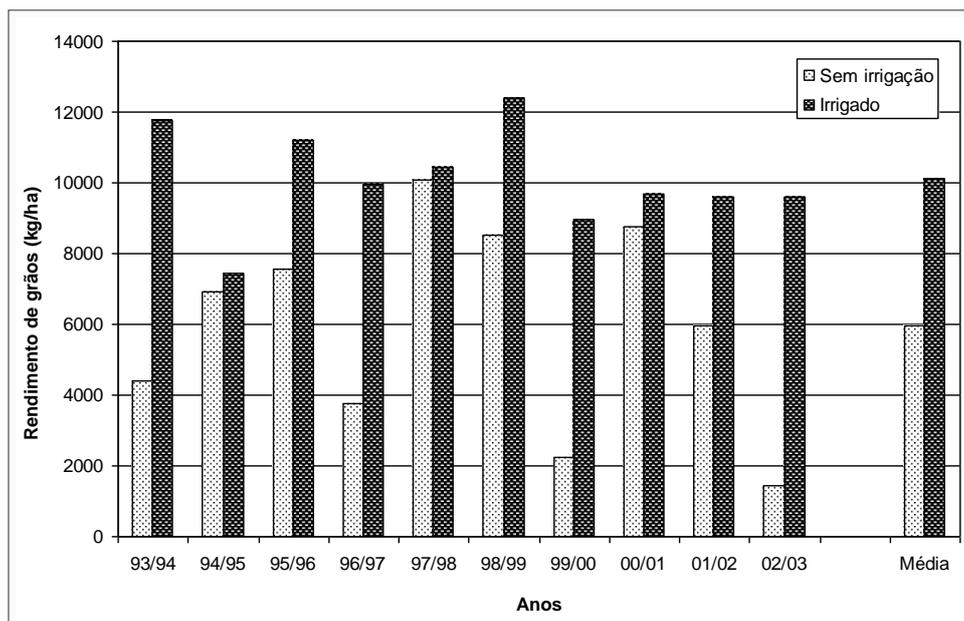
4.2.8 Evapotranspiração máxima (ETm) do milho

O milho é uma das culturas de maior consumo de água, considerando o K_c como parâmetro de comparação (Figura 13). Como este coeficiente normaliza a ETm em relação à demanda evaporativa (ETo), nesta comparação não está sendo considerada a duração do ciclo das culturas.

Na Tabela 1 são apresentados valores totais e médios diários de evapotranspiração máxima da cultura (ETm), para três épocas de semeadura, obtidos por Matzenauer, Bergamaschi e Berlato (1998b), na Depressão Central do Rio Grande do Sul. Os totais médios de ETm no ciclo completo da cultura são de 570, 572 e 541mm, para semeaduras de setembro, outubro e novembro, respectivamente. Para cada época, estes resultados são a média de vários anos, para uma população de 50 mil plantas por hectare. Para os 17 ambientes (anos x épocas) a média de ETm foi de 561mm no total do ciclo e de 4,3mm por dia. Na compilação de dados feita por Doorenbos e Pruitt (1975), são apresentados totais de evapotranspiração variando entre 400 e 700mm para a cultura do milho.

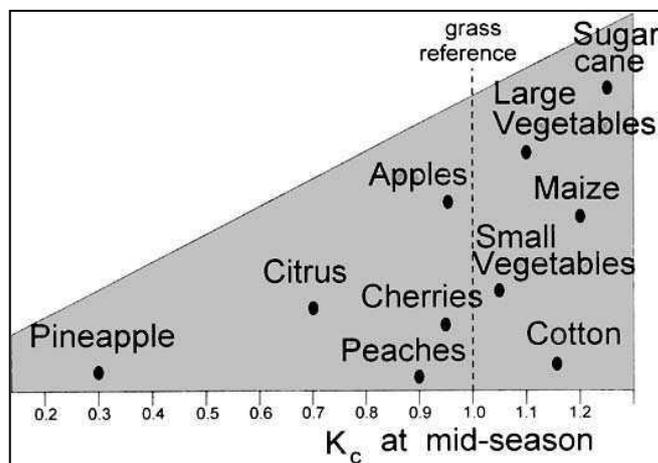
Os resultados mostram uma variação pequena do consumo total de água no ciclo do milho, entre as diferentes épocas de semeadura, levando-se em conta que os valores representam médias de vários anos. Como o desenvolvimento do milho depende basicamente da temperatura do ar, que por sua vez tem íntima relação com a radiação solar (a variável com maior efeito sobre a demanda evaporativa da atmosfera), a pequena variação de ETm pode ser esperada, pois o milho acelera ou alonga seu ciclo em função do regime térmico, que varia com a época de semeadura. Provavelmente, as variações serão maiores quando forem comparados valores de ETm de outros ambientes (regiões e climas diferentes), com outros níveis de manejo variáveis.

Figura 12 – Rendimento de grãos de milho com e sem irrigação, numa seqüência de 10 anos de experimentos de campo e na média do período, na Depressão Central do Rio Grande do Sul.



Fonte: BERGAMASCHI et al., 2004b.

Figura 13 – Coeficientes de cultura (K_c) para diferentes espécies cultivadas, na porção média do ciclo.



Fonte: ALLEN et al., 1998.

Os valores médios diários de ETm no ciclo do milho variam de 4,0mm, para a época de setembro, a 4,6mm, para a época de outubro, ficando em 4,4mm, para a época de novembro. Porém, para diferentes subperíodos, são observadas grandes diferenças de ETm diária, com um baixo consumo no início do ciclo, valores máximos durante o período de maior cobertura foliar, diminuindo no final

do ciclo com a senescência das folhas. No subperíodo da sementeira à emergência, a ETm da cultura é baixa, pois somente a evaporação do solo é significativa, visto que ainda não existe área foliar. No início do desenvolvimento das plantas, logo após a emergência, o consumo de água tem pequeno aumento em relação ao subperíodo anterior. Isso é explicado, pois a evaporação do solo compreende, ainda, a maior parte da evapotranspiração total, pois a cultura possui um baixo índice de área foliar (IAF). Esses resultados também estão de acordo com as citações de Chang (1968), segundo o qual durante os estádios iniciais de cultivos em linha a maior parte da água é perdida por evaporação na superfície do solo. À medida que a cultura cresce e se desenvolve, aumenta a ETm devido ao aumento do IAF e à maior demanda evaporativa da atmosfera. O aumento da evapotranspiração com a área foliar é atribuído à transpiração crescente, enquanto a evaporação do solo tende a diminuir devido ao sombreamento pelas plantas. No final do ciclo, da maturação leitosa à maturação fisiológica, ocorre redução na evapotranspiração devido ao declínio da atividade fotossintética das folhas, à redução da área foliar, principalmente em culturas anuais, quando ocorre a rápida secagem dos colmos e folhas, e à diminuição da demanda evaporativa da atmosfera (Figura 10).

Tabela 1 – Evapotranspiração máxima (ETm) da cultura do milho (mm), em valores totais e médios diários, em diferentes subperíodos de desenvolvimento e no ciclo, para três épocas de sementeira, com população de 50.000 plantas por hectare.

Subperíodo*	Época de sementeira**					
	Setembro		Outubro		Novembro	
	ETm		ETm		ETm	
	Total	Média	Total	Média	Total	Média
S-E	16	1,7	14	2,1	18	2,8
E-30d	80	2,7	92	3,1	128	4,3
30d-P	180	4,9	162	5,3	174	5,6
P-ML	120	5,7	174	6,6	86	5,1
ML-MF	174	4,0	130	4,2	135	3,6
S-MF	570	4,0	572	4,6	541	4,4

* S - sementeira; E - emergência; 30d - 30dias após a emergência; P - 50% do pendoamento; ML - maturação leitosa; MF - maturação fisiológica.

** Valores médios do período: época de setembro-1982/83 a 1988/89; época de outubro-1976/77 a 1981/82; época de novembro-1983/84 a 1987/88

Fonte: MATZENAUER, BERGAMASCHI, BERLATO, 1998a.

Resultados levemente superiores de ETm foram obtidos em Eldorado do Sul, RS, quando a densidade de sementeira foi aumentada para 67 mil plantas

por hectare, para um híbrido precoce de milho (RADIN et al., 2003; BERGAMASCHI et al., 2001). Empregando-se um lisímetro de pesagem, durante os anos de 1993/94 a 1996/97, foram obtidos totais de 575 a 732 mm de ETm durante todo o ciclo da cultura. Na média dos quatro anos, a média da ETm foi de 656mm no total do ciclo do milho e de 5,1mm por dia. O consumo diário de água da cultura variou de 2,6 a 6,9 mm dia⁻¹ (Tabela 2), com média de 5,1 mm dia⁻¹. Portanto, resguardadas as diferenças entre os genótipos, para um aumento de 33% na população de plantas houve um aumento de apenas 17% na demanda hídrica total do ciclo e de 19% na demanda média diária. Embora a radiação solar seja a principal causa da evapotranspiração, acréscimos na população de plantas acima de determinados níveis não conduzem a aumentos proporcionais no consumo de água das lavouras, pois a radiação interceptada não aumenta linearmente com índice de área foliar. Há uma tendência de estabilidade na eficiência de interceptação de radiação solar com a elevação do IAF, o que explica a redução nos acréscimos de ETm em altas populações de plantas.

Tabela 2 – Evapotranspiração máxima (ETm), evapotranspiração de referência (ETo) calculada pelo método de Penman e coeficiente de cultura (Kc) em decêndios após a emergência do milho, na média de quatro anos, com população de 67.000 plantas por hectare, em Eldorado do Sul, RS.

Decêndios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETm (mm dia ⁻¹)	2,6	3,5	4,0	5,8	6,9	6,9	6,2	6,2	5,4	5,0	4,5	4,5
ETo (mm dia ⁻¹)	5,1	4,4	4,5	5,2	5,6	5,4	4,8	4,9	4,0	3,8	3,7	4,0
Kc (ETm/ETo)	0,5	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	1,2	1,1

Fonte: RADIN et al., 2003.

A Figura 14 representa o padrão de variação da evapotranspiração diária e do índice de área foliar ao longo do ciclo do milho, obtido em região subtropical do Rio Grande do Sul (RADIN et al., 2003). Observa-se que, para um mesmo IAF, houve maior consumo de água durante o crescimento vegetativo que no enchimento de grãos. Esta diferença se deve à maior demanda evaporativa atmosférica na primeira metade do ciclo (próximo ao solstício de verão) que no período reprodutivo, que ocorreu na segunda metade do verão. Uma causa secundária para esta diferença é a própria redução da atividade fisiológica da

cultura ao longo do ciclo. Portanto, ET_m pode ter grandes diferenças em função de diferenças nas condições atmosféricas, mesmo que o padrão de manejo das lavouras seja semelhante. Isto reforça a importância de normalizar os dados de consumo de água da cultura pelo uso de parâmetros que expressem a demanda evaporativa atmosférica, através de coeficientes de cultura (K_c).

Assim, quando o consumo diário de água da cultura é normalizado pela evapotranspiração de referência, obtém-se o coeficiente de cultura (K_c). Este índice reduz a influência da demanda evaporativa da atmosfera, o que permite minimizar o efeito das variações nas condições de tempo. A Figura 6 relaciona os coeficientes K_c do milho com o índice de área foliar, a partir de dados oriundos dos quatro anos, relatados por Radin et al. (2003). Esta relação gerou uma função linear que pode ser utilizada para estimar a necessidade diária de água da cultura a partir de E_{To} e IAF, como variáveis de campo. Esta função generaliza, assim, a possibilidade de obtenção de ET_m para milho sob qualquer demanda evaporativa atmosférica e numa ampla faixa de populações de plantas. Ela demonstra que, além do efeito da demanda evaporativa atmosférica, a necessidade de água do milho depende da população de plantas e da evolução área foliar ao longo do ciclo.

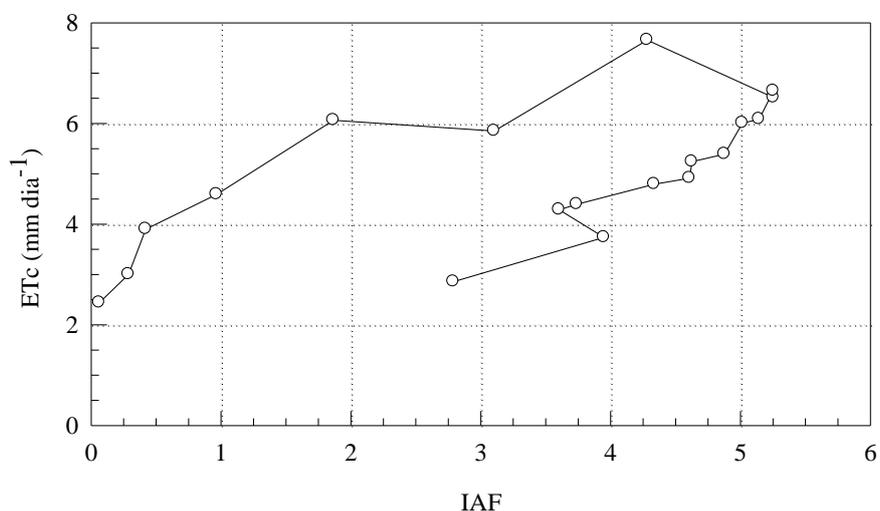
4.2.9 Coeficientes relacionando ET_m com E_{To}, E_o e R_s

Conforme já descrito, para estimar a evapotranspiração máxima de uma cultura em diferentes ambientes (anos, locais e épocas de cultivo), é necessário estabelecer relações entre a ET_m e um valor de referência (elemento ou parâmetro meteorológico derivado). Matzenauer, Bergamaschi e Berlato (1998b) determinaram coeficientes relacionando a ET_m do milho com a evapotranspiração calculada pelo método de Penman, a evaporação do tanque classe A e a radiação solar global.

Dados médios da razão entre evapotranspiração máxima do milho (ET_m) e evapotranspiração calculada pelo método de Penman (E_{To}) (coeficiente K_c), para os diferentes subperíodos e no ciclo total da cultura, em três épocas de semeadura, são apresentados na Tabela 3. A razão ET_m/E_{To} apresenta valores médios durante o ciclo do milho de 0,74, 0,81 e 0,80 para semeaduras de setembro, outubro e novembro, respectivamente. O padrão de variação do K_c é semelhante nas três épocas de semeadura. Os menores valores ocorrem da semeadura à emergência e da emergência até 30 dias após. Isto se deve à baixa

transpiração no início do ciclo, quando a evaporação do solo é o principal componente da evapotranspiração, em função do baixo IAF mesmo no segundo subperíodo. De 30 dias após a emergência a 50% do pendoamento ocorre grande incremento da área foliar, atingindo valores máximos do pendoamento à maturação leitosa. Por esse motivo e pelo fato de haver elevada atividade fisiológica das plantas, coincidindo com períodos de alta demanda evaporativa da atmosfera, os maiores valores de Kc foram verificados durante esses subperíodos, aproximando-se de 1,0 durante a floração e início de enchimento de grãos. No final do ciclo, da maturação leitosa à maturação fisiológica, ocorre redução nos coeficientes para as três épocas de semeadura, devido à diminuição da atividade fotossintética e senescência das folhas. Este padrão está de acordo com resultados de Camargo e Pereira (1990), os quais afirmam que, em termos práticos, o Kc pode ser considerado como uma função da percentagem de cobertura do terreno pela folhagem da cultura. A Figura 15 demonstra a estreita relação entre os coeficientes Kc do milho e o índice de área foliar.

Figura 14 – Evapotranspiração da cultura (ETc) e índice de área foliar (IAF) ao longo do ciclo do milho, média de quatro anos, com população de 67.000 plantas por hectare. Eldorado do Sul/RS.



Fonte: RADIN et al., 2003.

Para milho o índice de área foliar atinge seu valor máximo ao redor do pendoamento, quando a folha bandeira acaba de expandir-se. Por sua vez, sendo função direta de IAF, o coeficiente Kc aumenta rapidamente no período de crescimento da cultura, atinge seu valor máximo próximo ao pendoamento e

decrece lentamente durante o período reprodutivo, com a senescência das folhas inferiores. Durante a maturação, com a senescência rápida das folhas, a transpiração das plantas e, portanto, o K_c diminuem de forma brusca. Resultados de (RADIN et al., 2003; BERGAMASCHI et al., 2001), apresentados nas Figuras 14 e 15 (já discutidas) demonstram as relações entre ET_m e coeficiente K_c com o índice de área foliar do milho.

Os coeficientes K_c apresentados na Figura 13 e na Tabela 2 são levemente superiores àqueles da Tabela 3, obtidos por Matzenauer, Bergamaschi e Berlato (1998b). A diferença pode ser atribuída ao aumento da população, de 50 para 67 mil plantas por hectares, que também elevou a ET_m total do ciclo e média diária, na mesma região climática. Ambos conjuntos de resultados foram obtidos através de medições em lisímetros, na mesma região subtropical do Rio Grande do Sul. A diferença básica foi o aumento na população de plantas, seguindo recomendações dos órgãos de pesquisa.

É importante considerar que, para a obtenção dos coeficientes K_c relatados, foi empregada a evapotranspiração de referência calculada pelo método original de Penman. Há uma tendência universal de preferência por ET_o calculada pelo método de Penman-Monteith, atendendo recomendação da FAO (ALLEN et al., 1998). Esta adaptação ao método original de Penman introduz nova parametrização que alteram os resultados finais. Tessari et al. (2008) compararam dados de ET_o calculados por ambos métodos, com médias diárias e mensais de sete anos em região subtropical do Rio Grande do Sul. A evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith é 8% mais baixa que ET_o estimada pelo método original de Penman. Isto significa que os coeficientes K_c que relacionam ET_m com ET_o calculada segundo Penman-Monteith devem ser 8% superiores aos coeficientes apresentados neste texto, que consideram ET_o segundo o método de Penman original.

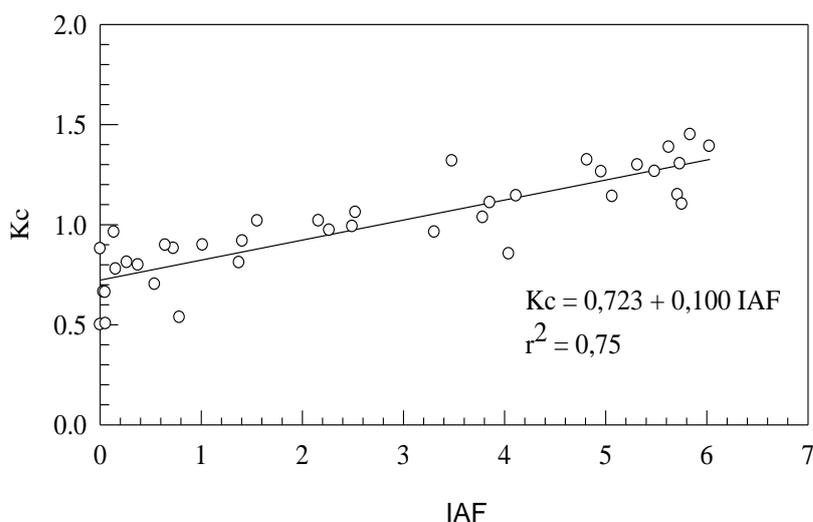
Tabela 3 – Evapotranspiração máxima (ETm), evapotranspiração de referência (ETo) calculada pela fórmula de Penman e a razão ETm/ETo (coeficiente Kc) em diferentes subperíodos e no ciclo total do milho, com população de 50.000 plantas por hectare. Valores médios diários (mm) para três épocas de semeadura.

Subperíodo*	Época de semeadura**								
	Setembro			Outubro			Novembro		
	ETm	ETo	Kc	ETm	ETo	Kc	ETm	ETo	Kc
S-E	1,7	4,3	0,40	2,1	5,3	0,40	2,8	6,0	0,47
E-30d	2,7	4,9	0,55	3,1	5,7	0,54	4,3	6,1	0,70
30d-P	4,9	5,6	0,88	5,3	5,7	0,93	5,6	6,0	0,93
P-ML	5,7	5,9	0,97	6,6	6,3	1,05	5,1	5,3	0,96
ML-MF	4,0	5,7	0,70	4,3	5,5	0,78	3,6	4,9	0,73
S-MF	4,0	5,4	0,74	4,6	5,7	0,81	4,4	5,5	0,80

* S - semeadura; E - emergência; 30d - 30dias após a emergência; P - 50% do pendoamento; ML - maturação leitosa; MF - maturação fisiológica.

Fonte: MATZENAUER; BERGAMASCHI; BERLATO, 1998b.

Figura 15 – Coeficiente de cultura ($Kc = ETm/ETo$) em função do índice de área foliar (IAF) para todo o ciclo do milho em quatro anos (1993/94 a 1996/97), com população de 67.000 plantas por hectare, em Eldorado do Sul, RS.



Fonte: BERGAMASCHI et al., 2001.

Na Tabela 4 são apresentados os dados médios da razão entre a evapotranspiração máxima da cultura (ETm) e a evaporação do tanque classe A (Eo) (coeficiente Kc_1) nos diferentes subperíodos e ciclo do milho, para três épocas de semeadura. Os valores médios da razão ETm/Eo para o ciclo do milho foram de 0,66, 0,72 e 0,68 para as épocas de semeadura de setembro, outubro e novembro, respectivamente.

A evolução de Kc_1 ao longo do ciclo apresenta o mesmo padrão nas três épocas de semeadura. É menor da semeadura à emergência, aumenta até o subperíodo entre 50% do pendoamento à maturação leitosa e diminui no subperíodo da maturação leitosa à maturação fisiológica (Tabela 2). Verifica-se, portanto, um aumento da razão ETm/Eo com o incremento de IAF. Há pequena variação nos valores médios de ETm/Eo entre as épocas de semeadura. Isto pode ser esperado, considerando-se que as variáveis meteorológicas que determinam a demanda evaporativa da atmosfera exercem efeitos semelhantes sobre a perda de água de superfícies vegetadas e sobre a evaporação de superfície de água (Eo). Como a ETm de culturas depende da demanda evaporativa e do estágio fenológico, as variações observadas podem ser atribuídas a diferenças de crescimento e desenvolvimento das plantas, entre épocas de semeadura e anos, em função das variações dos elementos meteorológicos que afetam a cultura e as práticas culturais.

Tabela 4 – Evapotranspiração máxima (ETm), evaporação do tanque classe A (Eo) e razão ETm/Eo (coeficiente Kc_1) em diferentes subperíodos e no ciclo do milho. Valores médios diários (mm) para três épocas de semeadura, com 50.000 plantas por hectare.

Subperíodo*	Época de semeadura**								
	Setembro			Outubro			Novembro		
	ETm	Eo	Kc_1	ETm	Eo	Kc_1	ETm	Eo	Kc_1
S-E	1,7	4,3	0,40	2,1	5,7	0,37	2,8	6,8	0,41
E-30d	2,7	5,3	0,51	3,1	6,0	0,52	4,3	7,2	0,60
30d-P	4,9	6,3	0,78	5,3	6,4	0,83	5,6	6,9	0,81
P-ML	5,7	7,0	0,81	6,6	7,2	0,92	5,1	6,3	0,81
ML-MF	4,0	6,4	0,63	4,3	6,5	0,66	3,6	5,6	0,64
S-MF	4,0	6,1	0,66	4,6	6,4	0,72	4,4	6,5	0,68

* S - semeadura; E - emergência; 30d - 30dias após a emergência; P - 50% do pendoamento; ML - maturação leitosa; MF - maturação fisiológica.

Fonte: MATZENAUER; BERGAMASCHI; BERLATO, 1998b.

Na Tabela 5 são apresentados valores médios de evapotranspiração máxima da cultura (ETm), de radiação solar global (Rs) transformada em milímetros de evaporação equivalente, bem como da razão ETm/Rs (coeficiente Kc_2) para os diferentes subperíodos e no ciclo total da cultura do milho, para as três épocas de semeadura.

A razão ET_m/R_s apresenta valores médios durante o ciclo do milho de 0,45, 0,51 e 0,49, para as épocas de semeadura de setembro, outubro e novembro, respectivamente. Estes resultados significam que cerca de 50 % da energia solar incidente é utilizada no processo de evapotranspiração durante todo o ciclo da cultura do milho (da semeadura até a maturação fisiológica), na média das três épocas de semeadura.

A evolução da razão ET_m/R_s tem padrão semelhante nas três épocas de semeadura. Os menores valores ocorrem da semeadura à emergência e da emergência até 30 dias após, que são subperíodos com maior evaporação na superfície do solo e baixa transpiração, devido à ausência de área foliar no início do ciclo e baixos valores de IAF durante o início do período vegetativo. A exemplo dos resultados das razões ET_m/E_o e ET_m/E_{T_o} , os maiores valores da razão ET_m/R_s ocorrem durante os subperíodos dos 30 dias após a emergência até 50% do pendoamento e de 50% do pendoamento até a maturação leitosa, por possuírem maior área foliar e intensa atividade fisiológica. Durante o subperíodo de 50% do pendoamento até a maturação leitosa, o coeficiente atinge o valor de 0,68 para a época de semeadura de outubro, significando uma alta utilização de energia no processo de evapotranspiração, durante a floração e início de enchimento de grãos, caracterizado como o período mais crítico da cultura em relação à disponibilidade hídrica.

Os resultados mostram que a quantidade de energia utilizada na evapotranspiração é baixa no início do ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, sendo que aproximadamente 25% da energia total é utilizada no processo de evaporação, durante o subperíodo da semeadura até a emergência. Após a emergência das plantas ocorre um aumento gradativo da razão ET_m/R_s , até o subperíodo que engloba a floração e o início do enchimento de grãos, com uma média de cerca de 0,63 nas três épocas de semeadura, representando alta utilização de energia. No final do ciclo, durante o subperíodo da maturação leitosa até a maturação fisiológica, o percentual da energia solar utilizada na evapotranspiração diminui para menos de 50%.

A variação dos coeficientes de cultura (K_c , K_{c_1} e K_{c_2}) ao longo do ciclo do milho está de acordo com o padrão geral descrito por Allen et al. (1998), apresentado na Figura 16. Em geral, a magnitude dos coeficientes responde à evolução do índice de área foliar. Porém, as características do clima regional e

variações nos sistemas de cultivo também podem alterar seus valores. No caso do milho, os resultados obtidos com 67.000 plantas por hectare, no Rio Grande do Sul (Tabela 2), com K_c mínimo em torno de 0,5 no início do ciclo e máximo ao redor de 1,3 no meio do ciclo estão próximos ao modelo apresentado pelo Boletim 56 da FAO da Figura 16 (ALLEN et al., 1998).

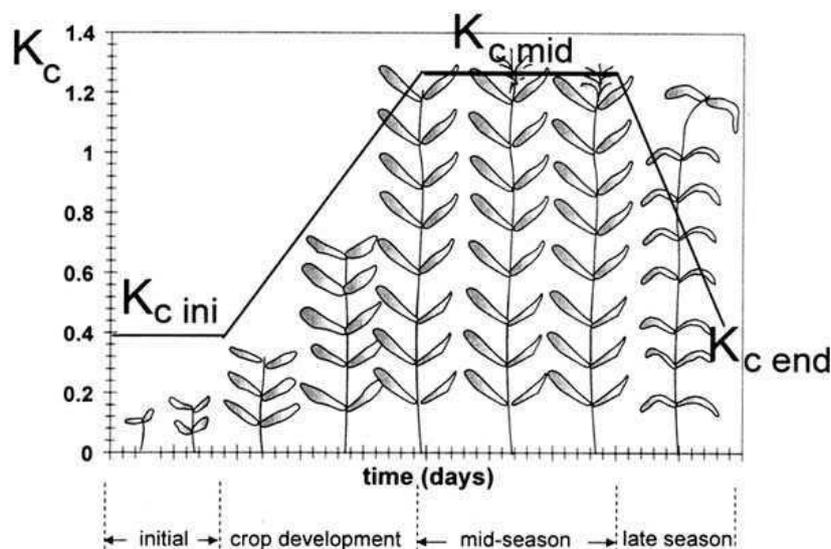
Tabela 5 – Evapotranspiração máxima (ETm), radiação solar global (Rs) e razão ETm/Rs (coeficiente K_{c2}) em diferentes subperíodos e no ciclo do milho. Valores médios diários (mm) para três épocas de semeadura, com 50.000 plantas por hectare.

Subperíodo*	Época de semeadura**								
	Setembro			Outubro			Novembro		
	ETm	Rs	K_{c2}	ETm	Rs	K_{c2}	ETm	Rs	K_{c2}
S-E	1,7	7,1	0,24	2,1	8,4	0,25	2,8	9,6	0,29
E-30d	2,7	8,2	0,33	3,1	9,1	0,34	4,3	9,8	0,44
30d-P	4,9	9,1	0,54	5,3	9,1	0,58	5,6	9,7	0,58
P-ML	5,7	9,5	0,60	6,6	9,7	0,68	5,1	8,5	0,60
ML-MF	4,0	9,1	0,44	4,3	8,6	0,50	3,6	7,8	0,46
S-MF	4,0	8,9	0,45	4,6	9,0	0,51	4,4	9,0	0,49

* S - semeadura; E - emergência; 30d - 30dias após a emergência; P - 50% do pendoamento; ML - maturação leitosa; MF - maturação fisiológica.

Fonte: MATZENAUER; BERGAMASCHI; BERLATO, 1998b.

Figura 16 – Variação típica do coeficiente de cultura (K_c) ao longo do ciclo de uma cultura anual.



Fonte: ALLEN et al., 1998.

REFERÊNCIAS

AGUINSKY, S. D. **Prognóstico e otimização do rendimento do milho (*Zea mays L.*) no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 1991. 196 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)– Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1991.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, Roma, n. 56, 1998, 326 p.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento do déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. p. 25-32.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A. **Can the no-tillage system affect the use of irrigation in tropical and subtropical cropping areas?** Roma: FAO, 2006.

Disponível em:

<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/publicat/no_tillage_system/no_tillagesystem.html>. Acesso em: 2012.

_____. The sustainable use of irrigation in Southern Brazil. **Revista GRID**, Roma, v. 26, p. 11-12, 01 fev. 2007.

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004a.

BERGAMASCHI, H. et al. Avaliação técnica e econômica da irrigação em milho na Depressão Central do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 49.; Reunião Técnica Anual do Sorgo, 32., 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre : FEPAGRO-SCT; EMATER-RS, 2004b. p. 1-4.

_____. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H. et al. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, Córdoba, v. 1, n. 1, p. 23-27, 2001.

BERGAMASCHI, H. et al. Deficiência hídrica em feijoeiro. IV. Alterações micrometeorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 7, p. 769-777, jul. 1989.

BERGAMASCHI, H. et al. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 603-613, 2007.

BERGONCI, J. I. et al. Diferença de temperatura dossel-ar como um indicador de déficit hídrico em milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7 n. 1, p. 5-11, 1999.

BERGONCI, J. I. et al. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p. 949-956, 2001.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. p.11-24.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 95 p. (Boletim Técnico, n. 7).

CAMARGO, A. P., PEREIRA, A. R. **Prescrição de rega por modelo climatológico**. Campinas: Fundação Cargill, 1990, 27 p. (Série Técnico Científica, n. 170).

CHANG, J. H. **Climate and agriculture: an ecological survey**. Chicago: Aldine. 1968. 304 p.

DALMAGO, G. A. et al. Transpiração do milho cultivado em sistemas de semeadura direta e convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UNIFRA; SBA; UFSM, 2003. v. 1. p. 295-296.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p. (Riego y drenage, n. 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, T. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma: FAO. 194 p. 1975. (Riego y Drenage, n. 24).

FONTANA, D. C. Determinação da evapotranspiração. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. 125 p.

FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.

HERRERO, M. P.; JOHNSON, R. R. Drought Stress and its effects on maize reproductive systems. **Crop Science**, Madison, v.21, p.105-110, 1981.

HILLEL, D.; GURON, Y. Relation between evapotranspiration rate and maize yield. **Water Resources Research**. Washington, v. 9, n. 3, p. 743-748, 1973.

MATZENAUER, R. **Evapotranspiração do milho (*Zea mays* L.) e suas relações com fórmulas e parâmetros meteorológicos.** 1980. 128 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1980.

_____. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul.** 1994. 172 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A. Evapotranspiração da cultura do milho, I: Efeito de épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p. 9-14, 1998a.

_____. Evapotranspiração da cultura do milho, II: relações com a evaporação do tanque classe A, com a evapotranspiração de referência e com a radiação solar global, em três épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n.1, p. 15-21, 1998b.

MATZENAUER, R. et al. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, p. 85-92, 1995a.

MATZENAUER, R.; FONTANA, D. C. Relação entre rendimento de grãos e altura de chuva em diferentes períodos de desenvolvimento do milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5., 1987, Belém. **Coletânea de Trabalhos...** Belém: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1987. p. 3-6.

MATZENAUER, R.; WESTPHALEN, S. L.; MALUF, J. R. T. Efeito de períodos de irrigação sobre o rendimento e desenvolvimento do milho, em diferentes épocas de semeadura – 1985/86. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 31., 1986, Porto Alegre. **Ata.** Porto Alegre: IPAGRO; EMATER/RS, 1986, p. 37-41.

MEDEIROS, S. L. P. et al. Relações entre evapotranspiração e rendimento de grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 6, n. 1, p. 1-10, 1991.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of Royal Society**, Serie A, London, v. 193, p. 120-145, 1948.

RADIN, B. et al. Evapotranspiração da cultura do milho em função da demanda evaporativa atmosférica e do crescimento de plantas. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 9, n. 1-2, p. 7-16, 2003.

SCHUSSLER, R.J.; WESTGATE, M.E. Maize kernel set at low potential: II. Sensivity to reduced assimilates at pollination. **Crop Science**, Madison, v. 31, p.1196-1203, 1991.

TESSARI, M. L. et al. Resgate de dados meteorológicos da EEA/UFRGS de 1970 a 2008 e estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman-Ponteith. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20., 2008; FEIRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17. 2008; SALÃO UFRGS JOVEM, 3., 2008, Porto Alegre. **Resumos...** Porto Alegre: UFRGS/Pró-Reitoria de Pesquisa, 2008. 1CD-ROM.

5 EVENTOS ADVERSOS

Embora seja uma cultura de elevado potencial produtivo, o milho apresenta grande sensibilidade a eventos meteorológicos adversos. Por isto, são frequentes quebras de safras ou destruição de lavouras por granizo, geada, vendavais, estiagens ou inundações. Alguns eventos abrangem grandes regiões e períodos longos, como as secas e estiagens. Outros, porém, como granizo, vendavais, inundações e as próprias geadas são de ocorrência esporádica e podem atingir regiões específicas, em pequena escala, porém causando danos intensos.

Fenômenos de grande escala são altamente prejudiciais em nível de macroeconomia, atingindo a produção de grandes regiões, às vezes englobando diversos Estados. Eles preocupam não somente os produtores rurais, mas também governos, agentes financeiros, cooperativas, agroindústrias, empresas de insumos e a sociedade em geral. Nas grandes estiagens, como das safras de 1990/91, 2003/04, 2004/05 e 2011/12, todas cadeias produtivas sofreram grandes impactos econômicos provocados pelas quebras de produção agropecuária. Seus efeitos se prolongaram pelos anos seguintes, pois houve grande descapitalização e redução do nível de empregos, em geral. No caso do milho, este impacto tende a ser elevado devido às grandes cadeias produtivas que ele movimenta. Recentemente, o milho adquiriu status de *commodity*, desde que grande parte do milho norte-americano passou a ser destinado à produção de etanol. Por isto, uma estiagem de grandes proporções, numa importante região produtora de milho, tem reflexos no mercado internacional de grãos e no agronegócio vinculado à sua produção, industrialização e comercialização.

Por outro, eventos esporádicos e de pequena escala, como granizo, vendavais, e geadas, tendem a afetar intensamente os produtores atingidos. Em alguns casos específicos, inundações também podem causar prejuízos aos produtores de milho. Por outro lado, esses eventos esporádicos podem causar impactos mais acentuados e imediatos ao produtor e às regiões atingidas. Além disso, em muitos casos, eventos esporádicos são de difícil previsão e mitigação por terem ocorrência eventual e restrita.

5.1 GEADAS, GRANIZO E VENDAVAIS

Baixas temperaturas do solo e geadas podem ser limitantes nas regiões de altitude do Sul do Brasil e nas semeaduras antecipadas, na saída do inverno. Nas últimas décadas, o surgimento de genótipos de ciclo muito curto (com menor exigência térmica), tais como híbridos hiperprecoces e superprecoces, permitiu grande expansão no cultivo do milho em regiões anteriormente consideradas marginais ou inaptas por insuficiência térmica, pelos zoneamentos climáticos. O mesmo ocorreu com a antecipação da semeadura do milho, na segunda metade do inverno. Também, nas chamadas “safrinhas” podem ocorrer baixas temperaturas no final do ciclo do milho, em muitas regiões, causando danos à produção por insuficiência térmica. Esses avanços técnicos também permitiram que a cultura do milho avançasse e se tornasse importante em regiões de grande latitude, como na Europa e América do Norte.

A baixa temperatura do solo durante o período de implantação de lavouras pode reduzir o “stand” de plantas, por dificultar e retardar os processos de germinação e emergência. A emergência das plântulas também pode ser afetada, ainda mais, se houver chuvas pesadas no período, que podem compactar o solo e formar crostas na superfície do mesmo. No Brasil, a adoção do sistema plantio direto reduziu os problemas de compactação e formação de crostas na superfície do solo (e a própria erosão). Por outro lado, o aquecimento do solo na primavera tende a ser mais lento em área com cobertura de palha na superfície. A bibliografia também cita redução na absorção de água e nutrientes pelas raízes, se a temperatura do solo for baixa. Porém, em geral, este problema tende a ser mais limitante em regiões ou países de clima frio, onde o início da primavera apresenta temperaturas muito baixas. No Brasil, a observância do zoneamento climático da cultura é indispensável e reduz, significativamente, os riscos por baixas temperaturas (inclusive geadas), se for respeitada a delimitação de zonas e épocas de cultivo. Para regiões frias, a adoção de híbridos superprecoces também é uma medida necessária, pois a estação de crescimento é mais restrita que nas regiões subtropicais e tropicais.

Por outro lado, em semeaduras tardias, quando a temperatura do solo é elevada e o solo pode secar rapidamente, o sistema plantio direto tem vantagens sobre o preparo convencional. A presença da palha sobre a superfície diminui o aquecimento diurno das camadas superficiais do solo, mantendo-o em

temperaturas mais adequadas. Além disso, o maior teor de matéria orgânica nessas camadas e a maior condutividade hidráulica do solo (não revolvido) mantém a umidade mais elevada nas camadas superficiais, favorecendo a germinação das sementes e a emergência das plântulas. Quando o solo já está aquecido é aconselhável a colocação mais profunda das sementes, para reduzir os riscos devido às temperaturas elevadas e à secagem do solo.

No início do ciclo, as plantas de milho mantêm seu ponto de crescimento abaixo do nível do solo, até aproximadamente seis folhas (estádio V6). Em torno do estágio V8 o primórdio da inflorescência masculina (pendão) se diferencia e a planta começa a alongar os primeiros internós. Enquanto o ponto de crescimento do milho estiver abaixo do nível do solo a geada, o granizo e os vendavais podem danificar as folhas, mas causarão pequeno ou nenhum impacto sobre o rendimento final (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993; KUMUDINI; TOLLENAAR, 1998). Mais tarde, embora as plantas se tornem mais sensíveis com o crescimento dos colmos e a elevação do ponto de crescimento, as geadas são menos prováveis e de menor intensidade durante a primavera.

Por outro lado, no início do ciclo as plantas de milho são sensíveis à inundação e toda planta tende a morrer, enquanto tiverem seu ponto de crescimento abaixo do nível do solo. Os vendavais fazem maiores danos em lavouras de milho na medida em que as plantas alongam seu colmo. Em geral, os danos são pequenos no início do ciclo, limitando-se à redução de “stand” se as plantas forem arrancadas. Ataque de pragas de solo ou a presença de camadas de impedimento no perfil do solo podem limitar o crescimento das raízes, aumentando os riscos de tombamento de plantas por efeito do vento.

Em lavouras com alta densidade de plantas e porte elevado os danos por vendavais tendem a aumentar. Populações elevadas de plantas tendem a formar colmos mais frágeis, devido à competição por radiação solar, facilitando a quebra de plantas. A redução do “stand” devido à quebra ou acamamento de plantas diminui o potencial de produção da cultura e aumenta as perdas na colheita, reduzindo o rendimento final e a qualidade dos grãos. A presença de quebra-ventos nas proximidades das lavouras pode diminuir riscos desta natureza, sobretudo em locais descampados e sujeitos a vendavais frequentes. Em locais de alta incidência de vendavais, o emprego de genótipos de porte baixo também pode reduzir riscos por quebra e acamamento de plantas. Quebra-ventos porosos e de grande altura (embora competindo com a cultura em uma faixa de domínio)

tendem a diminuir o consumo de água das lavouras, devido à redução da velocidade do vento.

Segundo Ritchie, Hanway e Benson (1993) a cultura do milho é altamente sensível ao granizo durante o pendoamento, por ter a inflorescência masculina exposta e pela grande área foliar jovem, que podem ser completamente destruídas. Além disso, sabe-se que o milho define o número de espigas por planta e o número de grãos por espigas no período de florescimento e polinização. Assim, a cultura é altamente sensível a eventuais ocorrências de granizo neste período, que podem causar grandes prejuízos às lavouras de milho.

5.2 SECAS E ESTIAGENS

O capítulo anterior que trata da “disponibilidade hídrica”, contém uma ampla análise das necessidades e sensibilidades da cultura ao déficit hídrico. O chamado período crítico está bem caracterizado, e isto se justifica pela grande sensibilidade que o milho tem aos estresses durante a polinização, fecundação e desenvolvimento inicial de grãos. É um período curto, com duração em torno de 12 a 15 dias, somente. Porém, uma curta estiagem acompanhada de alta demanda evaporativa atmosférica pode causar grandes prejuízos às lavouras.

É importante que o período crítico do milho seja bem caracterizado, para dimensionar os impactos de estiagens no rendimento do milho e para a adoção de práticas de manejo adequadas. A ocorrência de estiagens curtas, frequentes nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, tornam-se importantes quando o déficit hídrico coincide com os estádios em que as lavouras são mais sensíveis. Bergamaschi et al. (2004, 2006) fizeram uma ampla abordagem sobre este tema. As longas estiagens (secas), que são mais frequentes na região Nordeste do Brasil, podem causar prejuízos mesmo quando ocorrem fora do período crítico.

Medidas de mitigação podem reduzir os riscos por estiagens em nível de propriedade, como o escalonamento de épocas de semeadura e diversificação de genótipos de ciclos diferentes, o emprego de práticas conservacionistas, como o plantio direto, e a observância dos zoneamentos climáticos. Este conjunto de procedimentos tem permitido reduzir significativamente o impacto por estiagens de curta duração nas grandes regiões produtoras de milho do Brasil. Como o período crítico do milho é de curta duração, em torno do estádio R1, que abrange a polinização e início de formação de grãos (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993) a

cultura se torna altamente sensível ao déficit hídrico. Porém, pelo mesmo motivo, o escalonamento de épocas e genótipos é eficaz em diluir os riscos por estiagens de curta duração.

O emprego da irrigação vem aumentando no Brasil, mas ainda ocupa áreas relativamente pequenas. Por outro lado, além de aumentar significativamente os rendimentos de lavouras (sobretudo em alto nível de manejo), ela reduz as flutuações de safras e estabiliza a renda das propriedades. A utilização de equipamentos de precisão para o monitoramento e manejo das condições hídricas das lavouras tem sido facilitada pela disponibilidade de informações básicas provenientes da pesquisa. E a cultura do milho tem sido uma das mais pesquisadas quanto ao manejo de água.

Por outro lado, embora haja condições para emprego de irrigação em alto nível técnico, isto não implica necessariamente em sofisticação de procedimentos. Nem sempre o produtor pode dispor de infra-estrutura e sistemas complexos. Como foi visto em tópicos anteriores, se forem implementadas práticas para eliminar o déficit hídrico durante o curto período crítico do milho, sem outras limitações importantes, o produtor pode assegurar elevados rendimentos ao nível de lavoura. Um manejo adequado de lavouras deve incluir práticas de conservação de solo e água, rotação de culturas, escalonamento de épocas e genótipos e a observância de zoneamentos de cultivos. A alta necessidade hídrica das lavouras e a grande sensibilidade do milho durante o florescimento e início de formação de grãos, aliadas à elevada capacidade de resposta da cultura ao suprimento de água e nitrogênio, implica em cuidados especiais no período crítico. Bergamaschi et al. (2004) demonstraram que lavouras de milho em alto nível de manejo podem produzir 8 toneladas de grãos por hectare se forem irrigadas somente no período crítico. Assim, na eventualidade de haver estiagem durante o período crítico, o produtor poderá assegurar elevados rendimentos aplicando cerca de 80 a 90mm, em apenas duas ou três irrigações. Dalmago e Bergamaschi (2006) e Bergamaschi e Dalmago (2006, 2007) apresentaram uma análise conjuntural da utilização da irrigação no Brasil, considerando as tendências tecnológicas atuais, sobretudo relacionadas à expansão do sistema plantio direto e demais práticas conservacionistas.

A adoção dos índices de necessidade hídrica do milho e seus coeficientes Kc ao longo dos estádios fenológicos permite precisão no cálculo das doses de rega, a partir do monitoramento por estações meteorológicas automáticas. Alguns

produtores que irrigam suas lavouras já contam com monitoramento automatizado, ao nível de propriedade. Porém, na grande maioria, isto não acontece. Nestes casos, é possível dispor de dados meteorológicos em tempo real disponibilizados ao público por órgãos oficiais, através da Internet. É o caso do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que disponibiliza dados horários de uma vasta rede de estações automáticas através do *site* <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>. São dados que permitem elaborar todos os cálculos necessários para estimar o consumo diário de água das lavouras (ET_m), afim de fazer aplicações de alta precisão, na medida correta e precisa, de acordo com as necessidades das plantas. Além do INMET, outras instituições também possuem rede de estações meteorológicas e disponibilizam dados meteorológicos, tais como o Instituto Nacional de Pesquisas espaciais (INPE) e a Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuárias do Rio Grande do Sul (FEPAGRO). Além disso, a partir do monitoramento fenológico pode-se obter alta eficiência no uso da água, equipamento e mão-de-obra, observando seus períodos críticos. O próprio manejo do nitrogênio em lavouras de milho também requer monitoramento das condições hídricas. Ele representa um item importante nos custos de produção de nossas lavouras de milho e sua eficácia depende de um sistema de alto nível de manejo, no qual o adequado suprimento de água hídrica é condição fundamental.

REFERÊNCIAS

BERGAMASCHI, H. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A. **Can the no-tillage system affect the use of irrigation in tropical and subtropical cropping areas?** Roma: FAO, 2006.

Disponível em:

<http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/publicat/no_tillage_system/no_tillagesystem.htm>. Acesso em: 12 abr. 2012.

_____. The sustainable use of irrigation in southern Brazil. **Revista GRID**, Rome, v. 26, p. 11-12, 01 fev. 2007.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H. Irrigation in the context of the zero-tillage systems in Brazil. **Tropical Agriculture Association Newsletter**, Rothamstead, UK, v. 26, n. 3, p. 17-20, 2006.

KUMUDINI, S.; TOLLENAAR, T. Corn Phenology. In: TOLLENAAR, T. **Corn Physiology**. University of Guelph, Guelph, 1998. Disponível em:

<<http://www.plant.uoguelph.ca/research/homepages/ttollena/research/corn.html>>. Acesso em: 12 abr. 2012.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. **Special Bulletin**, Iowa, n. 48. 1993. Disponível em: <<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b->

[online/library/maize/www.ag.iastate.edu/departments/agronomy/corngrows.html](http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/library/maize/www.ag.iastate.edu/departments/agronomy/corngrows.html)>.

Acesso em: 2008. Tradução disponível em:

<[http://www.ipni.org.br/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/\\$FILE/Encarte103.pdf](http://www.ipni.org.br/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/$FILE/Encarte103.pdf)>. Acesso em: 2008.