

RELAÇÕES ENTRE RENDIMENTO DE MILHO E VARIÁVEIS HÍDRICAS¹

RELATIONSHIPS BETWEEN CORN YIELD AND WATER VARIABLES

Ronaldo Matzenauer², Homero Bergamaschi³, Moacir Antônio Berlatto³ e João Riboldi⁴

RESUMO

O déficit hídrico é o fator que mais tem contribuído para as reduções nas safras de milho no Estado do Rio Grande do Sul. Neste sentido, a quantificação das relações entre água e rendimento de grãos pode fornecer informações importantes, visando minimizar o impacto dessa adversidade climática. Neste trabalho, foram estabelecidas relações entre o rendimento de grãos de milho (*Zea mays* L.) e as variáveis hídricas precipitação pluvial (P), evapotranspiração real (ETr), deficiência hídrica (D) e consumo relativo de água (índice ETr/ETm) em diferentes períodos do ciclo da cultura. Os dados de rendimento e fenologia foram obtidos em experimentos conduzidos em Taquari, São Borja, Santo Augusto e Veranópolis, no período de 1975/76 a 1989/90. As análises foram feitas para os grupos de maturação precoce e normal. As variáveis hídricas às quais o rendimento esteve mais associado foram o consumo relativo de água, a deficiência hídrica e a evapotranspiração real, sendo a precipitação a que apresentou os piores ajustes. O período em que foram observadas as mais altas associações entre o rendimento e as variáveis hídricas foi o que engloba a floração e início de enchimento de grãos, caracterizando-se como o período de maior sensibilidade ao déficit hídrico.

Palavras-chave: rendimento de grãos, déficit hídrico, milho, evapotranspiração, modelagem agrometeorológica.

SUMMARY

Water deficit is the main factor responsible for reductions in corn (*Zea mays* L.) production in the

¹ Extraído da Tese de Doutorado apresentada pelo primeiro autor à Faculdade de Agronomia/UFRGS em abril de 1994.

² Eng^o Agr^o, Dr., Bolsista do CNPq, Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária/SCT/RS, Rua Gonçalves Dias 570, CEP 90130-060, Porto Alegre/RS.

³ Eng^o Agr^o, Dr., Bolsista do CNPq, Fac. de Agronomia/UFRGS, Caixa Postal 776, CEP 91501-970, Porto Alegre/RS.

⁴ Eng^o Agr^o, Dr., Instituto de Matemática/UFRGS.

State of Rio Grande do Sul, Brazil . Therefore, quantifying the relationship between water availability and grain yield will give important informations to help improve grain production in the state. In this study, we looked at the relationships between grain yield and variables related to water availability using precipitation (P), actual evapotranspiration (ET_r), water deficit (D) and relative water use (ET_r/ET_m) at different stages during the crop cycle. Phenological information and grain yield data were obtained from experiments conducted in Taquari, São Borja, Santo Augusto and Veranópolis, during the periods from 1975/76 to 1989/90. The analisys was performed for two maturity groups separately (early and normal). The variables that best described crop yield were the relative water use, water deficit, and evapotranspiration (ET_r), while the precipitation had the least fit. Higher associations between the crop yield and the water variables were observed from the silking to the beginning of the grain filling period.

Key words: grain yield, water deficit, corn, evapotranspiration, agrometeorological modelling.

INTRODUÇÃO

Os elementos meteorológicos são os principais responsáveis pelas oscilações e frustrações das safras agrícolas em todo o Brasil. No Rio Grande do Sul, inúmeras análises da produção agrícola apontaram alta correlação entre as variações, no tempo e no espaço, das safras das principais culturas com as condições meteorológicas e climáticas. Dentre estas, o fator hídrico é o que, com maior frequência e intensidade, afeta a produção das lavouras no Estado.

Em uma análise das condições de precipitação pluvial e dos impactos das estiagens na produção agrícola, BERLATO (1992) concluiu que a variabilidade interanual das condições hídricas do solo determinada pela variabilidade das chuvas é o fator isolado que exerce maior peso na variação dos rendimentos das culturas de primavera-verão no Rio Grande do Sul.

Os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento de interesse econômico de uma cultura vão depender da sua intensidade, duração, época de ocorrência e interação com outros fatores determinantes da expressão do rendimento final (CUNHA & BERGAMASCHI, 1992).

Muitos trabalhos tem sido realizados com o objetivo de verificar os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento de grãos e de identificar os períodos mais sensíveis ao déficit para a cultura do milho. Entretanto, os resultados experimentais variam dependendo da duração e intensidade do déficit, bem como do local, tipo de solo e cultivares. ROBINS & DOMINGO (1953) e DENMEAD & SHAW (1960) relatam que as maiores reduções no rendimento de grãos de milho, causadas pelo estresse hídrico, ocorrem a partir da emergência do pendão até cerca de uma semana após o espigamento. Os dados de CLAASSEN & SHAW (1970) indicam que o período de maior sensibilidade da cultura do milho, em

relação ao estresse, é a partir de aproximadamente uma semana antes do espigamento a duas semanas após o espigamento. MOSS & DOWNEY (1971) concluíram que o estresse antes do espigamento pode resultar na redução do número de grãos devido ao efeito da diminuição de carboidratos sobre a esterilidade dos gametas femininos. Por outro lado, KINIRY & RITCHIE (1985) mostraram que a redução no número de grãos inicia seis dias após o espigamento, em condições de estresse. GRANT et al (1989) verificaram que o intervalo em que o número de grãos foi mais sensível ao estresse hídrico iniciou dois a sete dias após o espigamento e terminou 16 a 22 dias após o espigamento. O peso de grãos foi reduzido pelo estresse durante o período de enchimento de grãos, e o menor peso (51% da testemunha) ocorreu com estresse no período de 12 a 16 dias após o 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). Segundo KRAMER (1969), os efeitos causados pelo déficit hídrico são devidos às modificações na anatomia, morfologia, fisiologia e bioquímica das plantas. Uma das conseqüências mais importantes da sensibilidade do alongamento celular ao déficit hídrico é a 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, como conseqüência, uma menor interceptação da radiação solar. Este efeito do déficit hídrico sobre a área foliar é de caráter permanente e, no caso das culturas de hábito de crescimento determinado, não há possibilidade de compensação via um aumento do número de folhas (BEGG & TURNER, 1976).

BERLATO (1992) mostra que os baixos rendimentos médios da cultura da soja, no Rio Grande do Sul, estão relacionados a anos em que ocorreram deficiências hídricas durante os meses de desenvolvimento da cultura e que, em anos considerados muito secos (1978/79, 1985/86, 1987/88 e 1990/91), os rendimentos médios estiveram abaixo de uma tonelada por hectare. Em um levantamento realizado pelo mesmo autor (não publicado) para a cultura do milho, também ficou demonstrada a dependência do rendimento de grãos ao regime hídrico durante o período de desenvolvimento dessa cultura. Durante o ano agrícola 1990/91 (ano muito seco) o rendimento médio no Estado foi de $1.100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, enquanto no ano seguinte, com maior quantidade e melhor distribuição de chuvas, o rendimento médio atingiu $2.700 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Esta análise, embora superficial, no sentido de que considera apenas o fator hídrico e numa escala espacial ampla, mostra a importância da precipitação pluvial na determinação do rendimento das culturas de primavera-verão no Estado.

MATZENAUER & FONTANA (1987) relacionaram o rendimento de grãos de milho com a precipitação em diferentes períodos da cultura, para as condições da Depressão Central do Rio Grande do Sul, através da análise de regressão. Os períodos em que as variáveis apresentaram melhor ajuste foram do início do pendoamento a 30 dias após e de uma semana antes do início do pendoamento a uma semana

após o final do espigamento. AGUINSKY (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 com o índice E_{Tr}/E_{Tm} (evapotranspiração real sobre evapotranspiração máxima), durante sete subperíodos e no ciclo da cultura, para as condições da Depressão Central do Rio Grande do Sul. O subperíodo em que as variáveis melhor se ajustaram foi de 10 dias antes do início do pendoamento a 10 dias após o final do espigamento, englobando o florescimento e o início de enchimento de grãos.

Buscando entender melhor a resposta da cultura do milho ao fator hídrico, foi desenvolvido este trabalho com os seguintes objetivos.

- Relacionar o rendimento de grãos da cultura do milho em diferentes épocas de semeadura e locais do Rio Grande do Sul com variáveis hídricas, com a finalidade de obter funções descrevendo o efeito das variáveis sobre o rendimento.
- Verificar, entre as variáveis hídricas estudadas, a que melhor se relaciona ao rendimento de grãos da cultura de milho.
- Verificar o período da cultura do milho de maior sensibilidade ao déficit hídrico.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de fenologia e rendimento de grãos da cultura do milho utilizados no trabalho, foram obtidos em experimentos de épocas de semeadura conduzidos pela Equipe de Agrometeorologia da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO/SCT/RS) durante o período de 1975/76 a 1989/90, em quatro Estações de Pesquisa: Taquari, localizada na região climática da Depressão Central; São Borja, no Baixo Vale do Uruguai; Santo Augusto, nas Missões e Veranópolis, na Serra do Nordeste.

Foram utilizados dados de rendimento médio de grãos corrigido a 14% de umidade de dois grupos de maturação (precoce e normal), de diversas épocas de semeadura, em cada local. Os locais, com o respectivo período experimental e número de informações, são apresentados na Tabela 1. Cada informação (n) representa o rendimento médio dos híbridos de cada grupo de maturação utilizados em cada caso, sendo, também, utilizada a fenologia média dos híbridos.

Os experimentos conduzidos em Taquari, durante o período de 1975/76 a 1978/79, foram irrigados pelo método de escoamento por sulcos. No restante do período experimental (1979/80 a 1989/90) e nas demais localidades, os resultados foram obtidos em condições naturais de disponibilidade hídrica.

Tabela 1 - Período experimental e número de informações (n), para cada local.

Locais	Período experimental	n
Taquari	1975/76 a 1989/90	31
São Borja	1978/79 a 1981/82	13
Santo Augusto	1975/76 a 1980/81	24
Veranópolis	1979/80 a 1989/90	21
TOTAL	1975/76 a 1989/90	89

O milho foi semeado com espaçamento entre fileiras de 0,80 a 1,00m, com uma densidade variando entre 40.000 e 50.000 plantas por hectare. A correção e adubação do solo foram feitas conforme recomendação baseada nas análises de solo. A fenologia utilizada nos experimentos foi: semeadura; emergência; início do pendoamento; 50% do pendoamento; início do espigamento; 75% de espigamento e maturação fisiológica. Na seleção de dados para este trabalho, foram descartados casos em que os resultados experimentais tornaram-se inviáveis devido a: não disponibilidade de informação meteorológica, insuficiente densidade de plantas, alto coeficiente de variação dos experimentos, intenso ataque de pragas e doenças, danos por fenômenos adversos como vendavais, granizo e excesso de chuvas.

Os dados meteorológicos foram obtidos na Equipe de Agrometeorologia da FEPAGRO. Foram utilizados os seguintes elementos meteorológicos, em nível diário: precipitação pluvial (mm), radiação solar global ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (m.s^{-1} ou Km.dia^{-1}).

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pelo método de Penman:

$$ET_o = (s/g)R_n + E_a / (s/g) + 1 \quad 1$$

sendo s a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água versus temperatura do ar ($\text{mb.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), g a constante psicrométrica ($\text{mb.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), R_n o saldo de radiação expresso em unidades de evaporação (mm) e, E_a o termo aerodinâmico (mm), onde:

$$E_a = 0,35(e_s - e_a)(0,5 + 0,01U_2) \quad 2$$

sendo $e_s - e_a$ o déficit de saturação de vapor d'água do ar (mm Hg) e U_2 a velocidade do vento a 2 m de altura (milhas.dia^{-1}).

Para o cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman o saldo de radiação (R_n)

foi estimado por uma função ajustada para a cultura do milho (MATZENAUER, et al 1981) onde R_n é função da radiação solar global.

A evapotranspiração máxima (ET_m) da cultura, para cada situação, foi estimada a partir de funções ajustadas entre a ET_m medida e a evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman (ET_o) (MATZENAUER, 1994). Os dados de ET_m foram obtidos em experimentos conduzidos durante o período de 1976/77 a 1988/89, na Estação Experimental de Taquari (MATZENAUER et al, 1993).

Para estimativa da evapotranspiração real (ET_r), utilizou-se o método do balanço hídrico segundo THORNTHWAITE & MATHER (1955). O balanço hídrico foi calculado utilizando-se diferentes capacidades de armazenamento de água no solo durante o ciclo, em função do desenvolvimento das plantas, sendo utilizadas as seguintes profundidades do solo para o cálculo da CAD, em cada período: da emergência a 20 dias após, 20 cm de profundidade; de 20 dias após a emergência a 40 dias após, 40 cm e de 40 dias após a emergência até a maturação fisiológica, 60 cm.

O balanço hídrico forneceu, como variáveis derivadas, a evapotranspiração real (ET_r), o déficit hídrico (D) e o excesso hídrico (E), sendo calculado, na mesma planilha, o índice ET_r/ET_m (consumo relativo de água), todos em nível diário. A opção pelo balanço hídrico diário foi feita após comparação com o balanço hídrico decendial, uma vez que as variáveis derivadas do balanço diário se associaram melhor ao rendimento de grãos. Para verificar a relação entre o rendimento relativo de grãos e as variáveis estudadas, foi utilizada a análise de regressão. As análises de regressão foram feitas para cada grupo de maturação e para cada local, bem como para o conjunto dos quatro locais (análise geral), utilizando-se, como variável dependente, o rendimento relativo de grãos (rendimento observado em relação ao rendimento máximo-Y/Y_m). O rendimento máximo foi definido como o maior rendimento observado para cada caso, conforme Tabela 2.

O rendimento relativo de grãos (Y/Y_m) foi relacionado às variáveis precipitação pluvial (P), evapotranspiração real (ET_r), deficiência hídrica (D) e consumo relativo de água (ET_r/ET_m), através da

Tabela 2 - Rendimento máximo de grãos de milho (Y_m) em kg.ha⁻¹ para cada local em cada grupo de maturação.

Local	Grupo de maturação	n	Y _m
Taquari	Precoce	31	9565
	Normal	31	7102
São Borja	Precoce	13	7184
	Normal	13	6620
Santo Augusto	Precoce	24	6375
	Normal	24	6414
Veranópolis	Precoce	21	6866
	Normal	21	6070
Geral	Precoce	89	9565
	Normal	89	7102

análise de regressão, pelo método dos mínimos quadrados, sendo testados diversos modelos. As análises foram feitas em quatro períodos de desenvolvimento da cultura, assim definidos: 1- Emergência a 30 dias após (EM-30EM); 2- 30 EM ao início do pendoamento (30EM-IP); 3- IP a 30 dias após (IP-30IP); 4- 30 IP à maturação fisiológica (30IP-MF).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados os coeficientes de determinação (R^2) para o modelo ao qual os dados melhor se ajustaram em cada caso, considerando, além dos valores de R^2 , o nível de significância dos coeficientes do modelo e o teste F da análise da variância.

Nas Tabelas 3, 4, 5 e 6, são apresentados os coeficientes de determinação das relações entre o rendimento relativo de grãos e as variáveis precipitação (P), evapotranspiração real (ETr), deficiência hídrica (D) e consumo relativo de água (ETr/ETm) nos quatro períodos de desenvolvimento do milho, para os dois grupos de maturação, para as localidades de Taquari, São Borja, Santo Augusto e Veranópolis, respectivamente.

Os resultados para a localidade de Taquari mostram menor associação entre as variáveis no período da emergência a 30 dias após (EM-30EM). Os maiores coeficientes de determinação foram obtidos, para as quatro variáveis e para os dois grupos de maturação, durante o período do início do pendoamento a 30 dias após (IP-30IP). As variáveis mais associadas ao rendimento relativo de grãos durante o referido período, foram o consumo relativo de água e a evapotranspiração real, seguida da deficiência hídrica e, por último, da precipitação (Tabela 3). O modelo potencial foi o que melhor explicou a relação entre o rendimento de grãos e as variáveis ETr/ETm e ETr, para os dois grupos de maturação.

Tabela 3 - Coeficientes de determinação (R^2) para as regressões entre rendimento relativo de grãos de milho e variáveis hídricas, em diferentes períodos de desenvolvimento da cultura. Taquari/RS. 1975/76-1989/90.

Período	Variável hídrica							
	P+I	M	ETr	M	D	M	ETr/ ETm	M
A - Grupo de maturação precoce								
EM - 30EM	0,013	3	0,242	3	0,082	3	0,100	3
30EM - IP	0,358	3	0,233	2	0,334	1	0,280	5
IP - 30IP	0,740	5	0,891	5	0,849	1	0,926	5
30IP - MF	0,303	3	0,550	5	0,292	1	0,441	3
B - Grupo de maturação normal								
EM - 30EM	0,032	3	0,212	3	0,078	3	0,080	1
30EM - IP	0,391	3	0,315	2	0,527	2	0,426	5
IP - 30IP	0,693	2	0,790	5	0,758	1	0,820	5
30IP - MF	0,184	3	0,416	3	0,258	2	0,411	3

EM - Emergência; 30EM - 30 dias após EM; IP - início do pendoamento; 30IP - 30 dias após IP; MF - maturação fisiológica.

P - precipitação pluvial; I - irrigação; ETr - evapotranspiração real; D - deficiência hídrica; ETr/ETm - índice hídrico.

M- Modelo de regressão que melhor se ajustou: (1) linear; (2) quadrático; (3) cúbico; (5) potencial.

Tabela 4 - Coeficientes de determinação (R^2) para as regressões entre rendimento relativo de grãos de milho e variáveis hídricas, em diferentes períodos de desenvolvimento da cultura. São Borja/RS. 1978/79-1981/82.

Período	Variável hídrica							
	P	M	ETr	M	D	M	ETr/ ETm	M
A - Grupo de maturação precoce								
EM - 30EM	0,252	2	0,567	2	0,325	2	0,087	2
30EM - IP	0,593	5	0,625	5	0,339	3	0,355	3
IP - 30IP	0,866	2	0,834	1	0,954	1	0,948	1
30IP - MF	0,376	2	0,220	1	0,164	1	0,090	2
B - Grupo de maturação normal								
EM - 30EM	0,272	2	0,530	2	0,287	2	0,105	2
30EM - IP	0,344	3	0,578	5	0,784	6	0,425	3
IP - 30IP	0,842	2	0,900	1	0,970	1	0,967	1
30IP - MF	0,388	3	0,107	1	0,100	3	0,116	5

EM - Emergência; 30EM - 30 dias após EM; IP - início do pendoamento; 30IP - 30 dias após IP; MF - maturação fisiológica.

P - precipitação pluvial; ETr - evapotranspiração real; D - deficiência hídrica; ETr/ETm - índice hídrico.

M- Modelo de regressão que melhor se ajustou. (1) linear; (2) quadrático; (3) cúbico; (5) potencial; (6) exponencial.

Tabela 5 - Coeficientes de determinação (R^2) para as regressões entre rendimento relativo de grãos de milho e variáveis hídricas, em diferentes períodos de desenvolvimento da cultura. Santo Augusto/RS. 1975/76-1980/81.

Período	Variável hídrica						
	P	M	ETr	M	D	M	ETr/ ETm M
A - Grupo de maturação precoce							
EM - 30EM	0,151	3	0,066	2	0,100	1	0,130 3
30EM - IP	0,494	3	0,311	1	0,188	3	0,321 2
IP - 30IP	0,733	2	0,836	1	0,873	3	0,815 1
30IP - MF	0,232	1	0,576	1	0,361	3	0,359 1
B - Grupo de maturação normal							
EM - 30EM	0,101	3	0,098	3	0,100	1	0,132 3
30EM - IP	0,566	3	0,416	1	0,250	2	0,361 3
IP - 30IP	0,640	2	0,871	3	0,894	3	0,820 1
30IP - MF	0,200	1	0,551	1	0,301	3	0,291 2

EM - Emergência; 30EM - 30 dias após EM; IP - início do pendoamento; 30IP - 30 dias após IP; MF - maturação fisiológica.

P - precipitação pluvial; ETr - evapotranspiração real; D - deficiência hídrica;

ETr/ETm - índice hídrico.

M- Modelo de regressão que melhor se ajustou.

(1) linear; (2) quadrático; (3) cúbico;

Tabela 6 - Coeficientes de determinação (R^2) para as regressões entre rendimento relativo de grãos de milho e variáveis hídricas, em diferentes períodos de desenvolvimento da cultura. Veranópolis/RS. 1979/80-1989/90.

Período	Variável hídrica						
	P	M	ETr	M	D	M	ETr/ ETm M
A - Grupo de maturação precoce							
EM - 30EM	0,259	2	0,036	3	0,225	3	0,208 3
30EM - IP	0,509	3	0,195	3	0,529	1	0,623 5
IP - 30IP	0,566	2	0,568	1	0,841	7	0,860 5
30IP - MF	0,120	3	0,466	2	0,310	3	0,347 5
B - Grupo de maturação normal							
EM - 30EM	0,130	3	0,142	3	0,144	3	0,116 3
30EM - IP	0,346	2	0,185	1	0,551	3	0,630 5
IP - 30IP	0,388	2	0,630	2	0,768	1	0,835 5
30IP - MF	0,105	3	0,145	1	0,116	2	0,312 3

EM - Emergência; 30EM - 30 dias após EM; IP - início do pendoamento; 30IP - 30 dias após IP; MF - maturação fisiológica.

P - precipitação pluvial; ETr - evapotranspiração real; D - deficiência hídrica;

ETr/ETm - índice hídrico.

M- Modelo de regressão que melhor se ajustou:

(1) linear; (2) quadrático; (3) cúbico; (5) potencial; (7) exponencial.

O período IP-30IP inclui a floração e o início de enchimento de grãos, identificados como os

períodos de maior consumo de água (DENMEAD & SHAW, 1959; MATZENAUER, 1980) durante o ciclo de desenvolvimento do milho, também definidos como períodos críticos em relação à disponibilidade hídrica. A deficiência hídrica, acompanhada de temperaturas elevadas, antecipou a emissão da inflorescência masculina e atrasou o aparecimento da inflorescência feminina, aumentando o intervalo entre o pendoamento e o espigamento, prejudicando a polinização e afetando o número de grãos da espiga. Segundo MOSS & DOWNEY (1971), o estresse hídrico antes do espigamento reduz o número de grãos devido ao aumento da esterilidade dos gametas femininos. Além disso, segundo GRANT et al (1989), o efeito do estresse hídrico sobre o número de grãos se prolonga até 22 dias após o espigamento.

Durante os períodos 30EM-IP e 30IP-MF, respectivamente final do período vegetativo e final do período reprodutivo, as relações entre as variáveis apresentaram coeficientes de determinação intermediários aos observados entre o período de menor associação (EM-30EM) e o período de maior associação (IP-30IP). Resultados semelhantes foram encontrados por MEDEIROS et al (1991) e AGUINSKY (1991), relacionando o rendimento relativo de grãos de milho com o índice ET_r/ET_m e com a precipitação efetiva, respectivamente.

As relações encontradas para a localidade de São Borja durante o período EM-30EM foram maiores do que as obtidas para Taquari, sendo, no entanto, junto com o período 30IP-MF, as mais baixas. Para essa localidade, foram observados os maiores coeficientes de determinação (Tabela 4). Novamente, a exemplo de Taquari, os melhores ajustes foram obtidos durante o período IP-30IP, confirmando os resultados que apontaram a floração e enchimento de grãos como o período em que o déficit hídrico causa maiores danos ao rendimento de grãos de milho. Mesmo no período que antecede a floração (30EM-IP), as variáveis mostraram uma boa associação, principalmente a precipitação e a evapotranspiração real para o grupo de maturação precoce, e evapotranspiração real e deficiência hídrica para o grupo de maturação normal. Durante o período IP-30IP, as variáveis deficiência hídrica e consumo relativo de água foram as que melhor se ajustaram ao rendimento relativo de grãos, com coeficientes de determinação maiores que 0,94 para os dois grupos de maturação. Ao contrário dos resultados encontrados para Taquari, a variável deficiência hídrica se ajustou melhor ao rendimento de grãos. No entanto, as diferenças para o ajuste com o consumo relativo de água foram pequenas. O modelo linear neste caso, foi o que melhor explicou as relações entre o rendimento de grãos e as variáveis D e ET_r/ET_m durante o período IP-30IP, para os dois grupos de maturação.

Entre as localidades estudadas, São Borja é a mais continental, situada a $56^{\circ}00'$ de longitude oeste, apresentando as maiores amplitudes térmicas, as temperaturas médias e médias das máximas mais elevadas e menor umidade relativa do ar, em relação aos demais locais. Além disso, apresenta menor número de dias de chuva e alta radiação solar nos meses de dezembro e janeiro. Estes dados, determinam valores elevados de demanda evaporativa da atmosfera, caracterizando o local como quente e com menor

disponibilidade hídrica, justificando as maiores associações obtidas entre as variáveis estudadas e o rendimento de grãos.

Para a localidade de Santo Augusto (Tabela 5), verificou-se a mesma tendência geral observada para Taquari e São Borja, mostrando baixa associação entre as variáveis durante o período inicial de desenvolvimento (EM-30EM), com os maiores valores dos coeficientes de determinação ocorrendo durante a floração e início de enchimento de grãos (IP-30IP). As variáveis que melhor se ajustaram ao rendimento relativo de grãos, durante esse período, foram deficiência hídrica, evapotranspiração real e o consumo relativo de água. Novamente, a exemplo dos resultados obtidos para São Borja, a deficiência hídrica foi a variável que melhor se ajustou ao rendimento relativo de grãos, para os dois grupos de maturação, apresentando coeficientes de determinação de 0,87 e 0,89, respectivamente (Tabela 5). Neste caso, o modelo cúbico foi o que apresentou melhores resultados na relação entre o rendimento de grãos e a deficiência hídrica durante o período IP-30IP. O ajuste com a precipitação, apesar de ter apresentado valores menores de R^2 durante o referido período, mostrou melhor ajuste que as demais variáveis durante o final do período vegetativo (30EM-IP). AGUINSKY (1991) relacionou o rendimento de grãos de milho com a precipitação efetiva para a localidade de Santo Augusto, encontrando, também, maior relação entre as variáveis durante o final do período vegetativo.

Para Veranópolis (Tabela 6), foi observada a mesma tendência encontrada para as localidades anteriores, com os menores ajustes no início e no final do ciclo da cultura, e com os maiores coeficientes de determinação, para as quatro variáveis, durante o período IP-30IP. As relações entre Y/Y_m e as variáveis P e E_{Tr} , foram as mais baixas neste período, comparando-se com os demais locais, sendo que as variáveis que melhor se ajustaram foram o consumo relativo de água e a deficiência hídrica. A exemplo dos resultados encontrados para Taquari, o modelo potencial foi o de melhor ajuste na relação entre o rendimento de grãos e o consumo relativo de água, durante o período IP-30IP. Veranópolis situa-se a 705 m de altitude, apresentando as temperaturas mais baixas entre os locais estudados, conduzindo a valores menores de demanda evaporativa da atmosfera. Este fato pode estar associado às menores relações encontradas para este local.

Os resultados das relações estabelecidas entre as variáveis, nos quatro períodos, são apresentados na Tabela 7. Conforme resultados obtidos nas análises individuais, no início do ciclo (EM-30EM) as relações foram menores. O início do ciclo da cultura do milho coincide, geralmente, com períodos de baixa demanda evaporativa da atmosfera, apresentando, também, menor consumo de água, uma vez que as plantas estão na fase inicial de desenvolvimento e, portanto, com baixo índice de área foliar. É o período em que foram verificados os menores valores de deficiência hídrica e, conseqüentemente, os maiores valores de consumo relativo de água. As maiores associações foram verificadas durante o período que engloba a floração e início de enchimento de grãos. Neste período, as variáveis que apresentaram melhor

associação ao rendimento relativo de grãos foram o consumo relativo de água e a deficiência hídrica, com coeficientes de determinação maiores para o grupo de maturação normal com valores de 0,80 e 0,79, respectivamente. Neste caso, os modelos que melhor se ajustaram na relação entre o rendimento de grãos e as variáveis E_{Tr}/E_{Tm} e D , foram o linear e o quadrático. As outras variáveis (P e E_{Tr}), apesar de apresentarem coeficientes de determinação significativos, mostraram um ajuste menor, principalmente a precipitação. Nos demais períodos (30EM-IP e 30IP-MF) as associações entre as variáveis foram menores, com coeficientes de determinação inferiores a 0,05.

Comparando-se os resultados da análise geral com os resultados das análises individuais, verifica-se que, de uma maneira geral, os coeficientes de determinação foram menores para a análise que englobou todos os locais. Este resultado pode ser explicado pelo maior número de dados, pela maior variabilidade nas condições ambientais entre os locais, e pelo fato de, ao longo do período experimental, terem ocorrido também, variações na adoção de práticas culturais, difíceis de serem padronizadas em um período longo de tempo.

As funções descrevendo as relações entre o rendimento de grãos e as variáveis hídricas durante o período IP-30IP, para as diferentes situações analisadas, são apresentadas na Tabela 8.

CONCLUSÕES

1. O consumo relativo de água (índice E_{Tr}/E_{Tm}) e a deficiência hídrica são as variáveis mais eficientes para indicar as variações de rendimento de grãos de milho no Estado do Rio Grande do Sul.
2. O período da cultura do milho que engloba a floração e início de enchimento de grãos é o mais crítico em relação ao déficit hídrico.
3. O rendimento de grãos da cultura do milho pode ser estimado a partir de variáveis hídricas, principalmente o consumo relativo de água e a deficiência hídrica.

Tabela 8 - Funções matemáticas das regressões entre rendimento relativo de grãos (Y/Ym) e as variáveis precipitação pluvial (P), evapotranspiração real (ETr), deficiência hídrica (D) e consumo relativo de água (ETr/ETm), durante o período IP-30IP, para Taquari, São Borja, Santo Augusto e Veranópolis, e para a análise geral.

Local		Variável	Função
Taquari	P	P	Y/Ym= 0,00975x(P) ^{0,8523}
		ETr	Y/Ym= 0,00092x(ETr) ^{1,532}
		D	Y/Ym= 1,0723-(6,517x10 ⁻³ (D))
		ETr/ETm	Y/Ym= 1,175x(ETr/ETm) ^{1,524}
	N	P	Y/Ym= 0,0172+(9,46x10 ⁻² (P))-(2,42x10 ⁻³ (P) ²)
		ETr	Y/Ym= 0,00377x(ETr) ^{1,124}
		ETr/ETm	Y/Ym= 1,238x(ETr/ETm) ^{1,233}
São Borja	P	P	Y/Ym= 0,022+(8,04x10 ⁻³ (P))-(1,75x10 ⁻⁵ (P) ²)
		ETr	Y/Ym= 0,274+(7,82x10 ⁻³ (ETr))
		D	Y/Ym= 1,02-(5,24x10 ⁻³ (D))
		ETr/ETm	Y/Ym= -0,242+1,308(ETr/ETm)
	N	P	Y/Ym= 0,014+(6,82x10 ⁻³ (P))-(1,03x10 ⁻⁵ (P) ²)
		ETr	Y/Ym= -0,24+(7,46x10 ⁻³ (ETr))
		ETr/ETm	Y/Ym= 0,997-(5,25x10 ⁻³ (D))
Santo Augusto	P	P	Y/Ym= -0,017+(9,24x10 ⁻³ (P))-(2,53x10 ⁻⁵ (P) ²)
		ETr	Y/Ym= -0,243+(7,895x10 ⁻³ (ETr))
		D	Y/Ym= 0,67+(8,6x10 ⁻³ (D))-(1,34x10 ⁻⁴ (D) ²)+(3,7x10 ⁻⁷ (D) ³)
		ETr/ETm	Y/Ym= -0,116+1,193(ETr/ETm)
	N	P	Y/Ym= -0,032+(8,05x10 ⁻³ (P))-(1,82x10 ⁻⁵ (P) ²)
		ETr	Y/Ym= 0,209-(1,67x10 ⁻² (ETr)+(3,6x10 ⁻⁴ (ETr) ²)-(1,48x10 ⁻⁶ (ETr) ³)
		ETr/ETm	Y/Ym= 0,68+(1,02x10 ⁻² (D))-(1,63x10 ⁻⁴ (D) ²)+(4,71x10 ⁻⁷ (D) ³)
Veranópolis	P	P	Y/Ym= -0,298+(1,125x10 ⁻² (P))-(2,62x10 ⁻⁵ (P) ²)
		ETr	Y/Ym= -0,364+(9,74x10 ⁻³ (ETr))
		D	Y/Ym= 1/(0,3126+0,0253(D))
		ETr/ETm	Y/Ym= 1,237x(ETr/ETm) ^{1,755}
	N	P	Y/Ym= 0,0051+(9,96x10 ⁻³ (P))-(2,85x10 ⁻⁵ (P) ²)
		ETr	Y/Ym= -1,09+(3,2x10 ⁻² (ETr))-(1,32x10 ⁻⁴ (ETr) ²)
		ETr/ETm	Y/Ym= 0,998-(4,325x10 ⁻³ (D))
Análise Geral	P	P	Y/Ym= -0,025+(6,475x10 ⁻³ (P))-(1,48x10 ⁻⁵ (P) ²)
		ETr	Y/Ym= -0,16+(6,5x10 ⁻³ (ETr))
		D	Y/Ym= 0,807-(4,07x10 ⁻³ (D))
		ETr/ETm	Y/Ym= -0,139+0,998(ETr/ETm)
	N	P	Y/Ym= -0,0416+(8,78x10 ⁻³ (P))-(2,22x10 ⁻⁵ (P) ²)
		ETr	Y/Ym= -0,37+(1,41x10 ⁻² (ETr))-(3,98x10 ⁻⁵ (ETr) ²)
		ETr/ETm	Y/Ym= 0,992-(4,982x10 ⁻³ (D))
			Y/Ym= -0,298+(2,05(ETr/ETm))-(0,84(ETr/ETm) ²)

P - grupo de maturação precoce; N - grupo de maturação normal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BEGG, J. E., TURNER, N. C. Crop Water deficits. Advances in Agronomy, San Diego, v. 28, p. 161-217.

- BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia Aplicada à Irrigação**. Porto Alegre. Editora da Universidade/UFRGS. p. 25-32. 1992.
- 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 Universidade/UFRGS. p. 11-24. 1992.
- CLAASSEN, M. M., SHAW, R. H. Water deficits effects on Corn. II: Grain components. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, p. 652-655. 1970.
- CUNHA, G. R. da, BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre, Editora da Universidade/UFRGS. p. 85-97. 1992.
- DENMEAD, O. T., SHAW, R. H. Evapotranspiration in relation to the development of the corn yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 51, p. 725-726. 1959.
- DENMEAD, O. T., SHAW, R. H. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 52, p. 497-498. 1960.
- GRANT, R. F., JACKSON, B. S., KINIRY, J. R. et al. Water deficit timing effects on yield components in mayze. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 1, p. 61-65. 1989.
- KINIRY, J. R., RITCHIE, J. T. Shade-sensitive internal kernel number of maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 77, p. 711-715. 1985.
- KRAMER, P. J. **Plant and soil water relationships: a modern synthesis**. New York, McGraw Hill. 482 p. 1969.
- MATZENAUER, R. **Evapotranspiração do milho (*Zea mays* L.) e Suas relações com fórmulas e parâmetros meteorológicos**. Porto Alegre, UFRGS, Faculdade de Agronomia. 128 p. Dissertação de Mestrado. Agronomia, Fitotecnia. 1980.
- MATZENAUER, R., WESTPHALEN, S. L., BERGAMASCHI, H. Estimativa do saldo de radiação sobre uma comunidade de milho (*Zea mays* L.) a partir da radiação global. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2. Pelotas, 1981. **Resumos ampliados ...** Pelotas, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p. 102-105. 1981.
- 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., Belém, 1987. **Coletânea de Trabalhos ...** Belém, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. p. 3-6. 1987.
- MATZENAUER, R., BERGAMASCHI, H., BERLATO, M. A. Evapotranspiração máxima do milho e

- relações com a evapotranspiração calculada pelo método de Penman, evaporação do tanque Classe A e radiação solar global, em três épocas de semeadura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. 8. Porto Alegre, 1993. **Resumos**, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p. 81. 1993.
- MATZENAUER, R. **Modelos Agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, UFRGS, Faculdade de Agronomia. 172 p. Tese Doutorado, Agronomia, Fitotecnia. 1994.
- MEDEIROS, S. L. P., WESTPHALEN, S. L., MATZENAUER, R. et al. Relações entre evapotranspiração e rendimento de grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. v. 26, n. 1, p. 1-10. 1991.
- MOSS, G. I., DOWNEY, L. A. Influence of drought stress on female gametophyte development in corn (*Zea Mays* L.) and subsequent grain yield. **Crop Science**, Madison, v. 11, p. 368-372. 1971.
- ROBINS, J. S., DOMINGO, C. E. Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 45, p. 618-621. 1953.
- THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. The water budget and its use in irrigation. **Yearbook of Agriculture**, Washington, p. 346-358. 1955.