

MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS PARA ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE MILHO, EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL¹

RONALDO MATZENAUER², HOMERO BERGAMASCHI³, MOACIR ANTÔNIO BERLATO³, 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, particularmente para o estabelecimento de modelos de relação planta-clima. Neste trabalho, foram ajustados e validados modelos de regressão linear múltipla e de Jensen, relacionando o rendimento de grãos de milho com o consumo relativo de água (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, num total de 89 dados para cada grupo. Os dois modelos testados apresentaram bom desempenho na estimativa do rendimento. Na validação dos modelos, verificou-se elevada associação entre o rendimento relativo observado e previsto pelos modelos, com coeficientes de correlação variando entre 0,893 e 0,946.

Palavras-chave: modelos agrometeorológicos, rendimento de grãos, déficit hídrico, milho.

AGROMETEOROLOGICAL MODELS TO ESTIMATE MAIZE YIELD AS A FUNCTION OF WATER AVAILABILITY IN THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL

ABSTRACT – Water deficit is the main factor responsible for reductions in maize production at Rio Grande do Sul State, Brazil. Therefore, quantifying the relationship between water availability and grain yield will give to us important informations to help improve production in the state. In this study, we looked at the relationships between grain yield and water availability using a multiple regression models and Jensen model, which relates productivity to relative water use (ETr/ETm) at different stages during the crop cycle. The data on grain yield and phenology were obtained from experiments conducted at Taquari, São Borja, Santo Augusto and Veranópolis experimental stations, during the periods from 1975/76 to 1989/90. The analysis was performed for two maturity groups separately (early and normal), with a total of 89 data points for each of the groups. Based on the available data, both models were good estimators of corn yield. Comparing the models results to the actual data, we notice a strong relationship between the relative yield observed and estimated with correlation coefficient varying from 0.893 to 0.946.

Key words: agrometeorological models, grain yield, water deficit, maize.

INTRODUÇÃO

No Estado do 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 culturas. Os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento de uma cultura vão depender da sua intensidade, duração, época de ocorrência e interação com outros fatores determinantes da

expressão do rendimento final (CUNHA e BERGAMASCHI, 1992).

Segundo BEGG e TURNER (1976), os efeitos do déficit hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento sobre o crescimento e rendimento das culturas, geralmente, têm sido estudados empiricamente. Citam que os principais trabalhos nesta área foram sumariados por SALTER e GOODE (1967). Eles concluíram que, embora não se tenha observado 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 são especialmente sensíveis ao déficit hídrico a partir da iniciação floral, na floração e durante o desenvolvimento de frutos e grãos.

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,

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. – FEPAGRO, Rua Gonçalves Dias 570, 90130-060 Porto Alegre, RS. Bolsista do CNPq.

3 Eng^o Agr^o, Dr. – Fac. de Agronomia/UFRGS, Caixa Postal 776, 90001-970 Porto Alegre, RS. Bolsista do CNPq.

4 Eng^o Agr^o, Dr. – Instituto de Matemática/UFRGS. Bolsista do CNPq. Recebido para publicação em 15/09/1995.

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.

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, os rendimentos médios estiveram abaixo de uma tonelada por hectare.

MEDEIROS et al. (1991) relacionaram o rendimento relativo de grãos de milho durante vários anos, 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 início de enchimento de grãos.

Diversos pesquisadores desenvolveram ou testaram modelos que relacionam o rendimento de grãos com variáveis meteorológicas, com a finalidade de estabelecer funções de predição do rendimento (JENSEN, 1968; THOMPSON, 1969; BAIER, 1973; HANKS, 1974; NELSON e DALE, 1978; FRERE e POPOV, 1980; BERLATO, 1987; LIU et al., 1989; CAMARGO e HUBBARD, 1993; entre outros).

Grande parte dos trabalhos apresentam modelos que utilizam, como variável independente, alguma expressão da disponibilidade hídrica, como precipitação pluvial, transpiração, evapotranspiração real, deficiência hídrica, relação entre precipitação e evapotranspiração de referência, relação entre evapotranspiração real e evapotranspiração máxima ou de referência. RAO et al. (1988) relacionam uma série de modelos de estimativa do rendimento.

BAIER (1979) fez uma revisão sobre os trabalhos que apresentam modelos de relação planta-clima, com o objetivo de propor uma classificação considerando escala de tempo, fonte de dados, abordagem, propósito e aplicações dos modelos. Usando estas características, foram sugeridos três grupos de modelos: (1) modelos de simulação do crescimento; (2) modelos de análise planta-clima; e (3) modelos estatístico-empíricos.

Os modelos de simulação do crescimento

consideram que o impacto das variáveis meteorológicas sobre um processo específico tal como fotossíntese, transpiração ou respiração, pode ser adequadamente simulado através de um conjunto de equações matemáticas, as quais são baseadas em dados experimentais. Como exemplos deste grupo podem ser citados os modelos CORNGRO (TSCHENCHKE e GILLEY, 1979), CERES-maize utilizado por LIU et al. (1989), e SOYGRO utilizado por SIQUEIRA e BERG (1991).

Os modelos de análise planta-clima procuram explicar, baseados em processos físicos e fisiológicos, o efeito de uma ou mais variáveis meteorológicas sobre a resposta das plantas. Esta categoria de modelos utiliza, freqüentemente, dados de conteúdo de água no solo ou evapotranspiração e outras variáveis, e as relacionam com informações de desenvolvimento morfológico, crescimento vegetativo ou rendimento das culturas (BAIER, 1979). Nesta categoria podem ser citados os modelos de JENSEN (1968), BAIER (1973), FRERE e POPOV (1980).

Os modelos estatístico-empíricos utilizam séries históricas de dados de rendimento e dados meteorológicos de uma determinada região. As variáveis independentes usadas são, freqüentemente, temperatura do ar, precipitação ou variáveis derivadas destas, admitindo-se que os efeitos individuais dessas variáveis sobre o rendimento das plantas podem ser separados. Como exemplo desta categoria de modelos, podem ser citados os trabalhos de THOMPSON (1969), MOTA (1983), LIU e LIU (1987) e CUELAR et al. (1991).

HANKS e RASMUSSEN (1982) fizeram uma revisão sobre a predição do rendimento das culturas em relação ao estresse de água na planta. Citam que a produção das culturas é, freqüentemente, limitada pela insuficiência de água em algum período durante a estação de crescimento, e que, mesmo em regiões úmidas, ocorrem, normalmente, períodos de menor precipitação que conduzem ao estresse hídrico. Os autores afirmam que o rendimento das plantas pode ser estimado pela análise da razão de transpiração (relação entre transpiração (T) e rendimento (Y)), ocorrendo, no entanto, variações devido à dependência dos elementos meteorológicos.

Um grande passo na derivação de métodos de predição do rendimento das plantas, com base no uso da água, foi dado por De WITT (1958). Ele forneceu evidências de que o rendimento das

plantas (Y) está diretamente relacionado à razão entre a transpiração (T) e a evaporação potencial (Eo) na forma:

$$Y = m (T/Eo) \quad (1)$$

Sendo m um fator de planta.

A principal vantagem desta relação é a inclusão do termo Eo, que representa a demanda evaporativa da atmosfera, e que diminui as variações locais sobre a transpiração. A desvantagem em se utilizar a transpiração, nos modelos de predição do rendimento, é que, em condições de campo, normalmente, é determinada a evapotranspiração (ET). Assim, segundo DOORENBOS e KASSAM (1979), T pode ser substituída por ET.

Diversos pesquisadores têm utilizado a evapotranspiração como base nos modelos de estimativa do rendimento. JENSEN (1968) propôs um modelo que utiliza a relação entre a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração máxima (ETm) para estimativa do rendimento relativo (Y/Ym), e que permite estabelecer pesos diferentes para os diversos estádios de desenvolvimento da cultura, da seguinte forma:

$$Y/Y_m = \prod_{i=1}^n (ET_r/ET_m)^{\lambda_i} \quad (2)$$

Sendo Y o rendimento observado, Ym o rendimento máximo e λ_i um coeficiente que representa a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico, durante o estágio de desenvolvimento i. Tendo em vista que o segundo membro da equação (2) é um produto, um déficit hídrico severo, durante um determinado estágio de desenvolvimento, pode determinar uma redução significativa no rendimento de grãos de uma cultura. Segundo BERLATO (1987), este modelo compatibiliza o conceito de período crítico das plantas em relação à água.

RAO et al. (1988) derivaram um modelo multiplicativo para a previsão do rendimento relativo, também compatibilizando o conceito de período crítico das plantas em relação à disponibilidade hídrica. A equação proposta é:

$$Y/Y_m = \prod_{i=1}^n [1 - K_i(1 - ET_r/ET_p)^i] \quad (3)$$

Onde K_i é um índice de sensibilidade à deficiência hídrica, dependente da espécie cultivada

e do período de crescimento da mesma e, ET_p , a evapotranspiração potencial. DOORENBOS e KASSAM (1979) apresentam valores de K_i para diversas culturas, em diferentes períodos de desenvolvimento. Este modelo apresenta limitações para culturas com valores de K_i elevados (como, por exemplo, a cultura do milho) quando a relação ET_r/ET_p é baixa, ou seja, em situações de maior deficiência hídrica, podendo, inclusive, conduzir a estimativas de valores negativos de rendimento.

BERLATO (1987) cita que os modelos de quantificação das relações entre déficit hídrico e rendimento das plantas, que levam em consideração diferentes subperíodos da cultura, podem ser enquadrados como tipos específicos da categoria de modelo de análise planta-clima da classificação de BAIER (1979).

BERLATO (1987) relacionou o rendimento relativo de diferentes grupos de maturação da cultura da soja no Rio Grande do Sul, com o índice ET_r/ET_o (evapotranspiração real sobre evapotranspiração de referência) utilizando como base o modelo multiplicativo de JENSEN (1968). Na validação do modelo, utilizando uma série de dados independentes, verificou um coeficiente de determinação de 0,914 para os grupos de maturação precoce e médio, e, 0,952 para o grupo de maturação tardio. Concluiu que o modelo de Jensen é compatível com o conceito de períodos críticos da soja em relação à água, pois pondera o efeito do déficit hídrico nos diferentes períodos de desenvolvimento da planta.

Buscando entender melhor a resposta da cultura do milho ao fator hídrico, foi desenvolvido este trabalho, com o objetivo de ajustar e validar modelos agrometeorológicos entre o rendimento de grãos e o consumo relativo de água, para diferentes localidades do Estado do Rio Grande do Sul.

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 experimentais: 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.

Para a análise dos dados, foram utilizados dois grupos de maturação da cultura do milho: grupo precoce e grupo normal. Como não foram mantidos os mesmos híbridos durante todo o período experimental, devido às alterações que ocorreram na recomendação dos mesmos, procurou-se selecionar materiais genéticos com características fenológicas e fenométricas semelhantes.

Foram utilizados dados de rendimento médio de grãos corrigidos a 14% de umidade, 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.

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

Os experimentos conduzidos na Estação Experimental de Taquari, durante o período de 1975/76 a 1978/79, foram irrigados pelo método 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.

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 (data em que 50% das plantas da parcela haviam emergido do solo); início do pendoamento (data em que 10% das plantas apresentavam pendão visível); 50% do pendoamento (data em que 50% das plantas apresentavam pendão visível); início do espigamento (data em que 10% das plantas apresentavam estigmas com aproximadamente 2cm de comprimento); 75% de espigamento (data em que 75% das plantas apresentavam estigmas com

aproximadamente 2cm de comprimento) 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 no banco de dados da 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 (1956), onde:

$$ET_o = (s/\gamma) R_n + E_a / (s/\gamma) + 1 \quad (4)$$

Sendo *s* a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água versus temperatura do ar ($\text{mb.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ a constante psicrométrica ($\text{mb.}^{\circ}\text{C}^{-1}$), *R_n* o saldo de radiação sobre uma superfície com vegetação de porte baixo, expresso em unidades de evaporação (mm) e, *E_a* o termo aerodinâmico (mm), expresso pela função:

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

Sendo *e_s-e_a* o déficit de saturação de vapor d'água do ar (mm Hg) e *U₂* a velocidade do vento a 2m 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).

A evapotranspiração máxima (ET_m) da cultura do milho, 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), com os valores acumulados durante o ciclo (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

(ETr), utilizou-se o método do balanço hídrico segundo THORNTHWAITE e MATHER (1955), empregando-se, como dados de entrada, a precipitação pluvial e a ETm do milho estimada. 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, 20cm de profundidade; de 20 dias após a emergência a 40 dias após, 40cm e de 40 dias após a emergência até a maturação fisiológica, 60cm de profundidade do solo.

O balanço hídrico forneceu, como variáveis derivadas, a evapotranspiração real (ETr), o déficit hídrico (D) e o excesso hídrico (E), sendo calculado, na mesma planilha, o índice ETr/ETm (consumo relativo de água), todos em nível diário.

Foram ajustados modelos para cada local, por grupo de maturação, 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/Ym). O rendimento máximo foi definido como o maior rendimento observado em cada caso, conforme Tabela 2.

TABELA 2 – Rendimento máximo de grãos de milho (Ym) em kg.ha⁻¹ para cada local em cada grupo de maturação

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

Para o ajuste dos modelos, o consumo relativo de água foi calculado em diferentes períodos de desenvolvimento da cultura, assim definidos:

1 – Emergência a 30 dias após a emergência (EM-30EM).

2 – 30 dias após a emergência ao início do pendoamento (30EM-IP)

3 – Início do pendoamento a 30 dias após (IP-30 IP).

4 – 30 dias após IP à maturação fisiológica (30 IP-MF).

Foram adotados dois modelos matemáticos, utilizando o consumo relativo de água calculado nos quatro períodos fenológicos (acima enumerados) como variáveis independentes (respectivamente X1, X2, X3 e X4), e o rendimento relativo de grãos (Y/Ym) como variável dependente (Y).

O modelo de regressão linear múltipla (modelo aditivo), dado na forma:

$$Y = \sum_{i=1}^n b_i X_i + a \quad (6)$$

Sendo Y o rendimento relativo (Y/Ym), X_i o consumo relativo de água no período i (ETr/ETm), b_i o coeficiente da variável X_i, a o termo constante da regressão e i os períodos fenológicos.

E o modelo de Jensen (modelo multiplicativo):

$$Y/Y_m = \prod_{i=1}^n (ET_r/ET_m)^{\lambda_i} \quad (7)$$

onde λ_i representa a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico durante o período i. Para a parametrização do modelo de Jensen, foi utilizada a análise não linear, pelo método iterativo de Gauss-Newton.

No ajuste dos modelos, foram obtidas as estimativas dos coeficientes do modelo de regressão linear múltipla e dos expoentes do modelo de Jensen, bem como o nível de significância dos mesmos, além do coeficiente de determinação. Na aferição dos modelos (relação entre o rendimento relativo de grãos observado versus o rendimento relativo estimado pelos modelos) foram obtidos o coeficiente de regressão (b), o desvio padrão dos erros de estimativa (S) e o coeficiente de correlação (r).

Para o ajuste dos modelos englobando os quatro locais (análise geral), foi utilizado um conjunto de 70 dados experimentais. Do total de dados disponíveis (89 para cada grupo de maturação), 19 foram anteriormente sorteados com a finalidade de fazer a validação dos modelos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados resultados para a forma completa dos modelos (variáveis X1 a X4) e para

a forma reduzida, somente com a variável X3. Esta forma de apresentação dos resultados dos modelos foi adotada, devido ao fato de, para a grande maioria dos casos analisados, ter sido constatado efeito significativo apenas dos coeficientes relacionados à variável independente no período IP-30 IP (X3). No modelo aditivo reduzido, somente é apresentado o termo intercepto da função (a), quando o mesmo é significativo.

Nas Tabelas 3 a 10, são apresentadas as estatísticas dos parâmetros estimados para os grupos de maturação precoce e normal, para os modelos de regressão múltipla e de Jensen, para as localidades de Taquari, São Borja, Santo Augusto e Veranópolis, respectivamente.

Para a localidade de Taquari, verifica-se que para o modelo de regressão na sua forma completa, somente o coeficiente b3 foi estatisticamente significativo, para os dois grupos de maturação (Tabela 3). O modelo completo explicou 88,8% da variação do rendimento relativo para o grupo de maturação precoce e 83,4% para

o grupo de maturação normal. Como os coeficientes b1, b2 e b4 não foram significativos, o modelo reduzido (variável ETr/ETm somente no período IP-30 IP), apresentou coeficientes de determinação muito próximos aos verificados para o modelo completo. Na análise de regressão simples entre o rendimento relativo de grãos e o consumo relativo de água no período 3, o modelo potencial apresentou um coeficiente de determinação de 0,926 (MATZENAUER et al., 1995), confirmando o período 3 como o que explica praticamente toda a variação do rendimento de grãos devida ao fator água.

Para o modelo de Jensen (Tabela 4), o único expoente significativo ao nível de 1%, também foi o da variável X3, para os dois grupos de maturação. Os coeficientes de determinação para o modelo multiplicativo foram menores que os obtidos para o modelo aditivo. Também neste caso, a forma reduzida do modelo se ajustou bem, apresentando, a exemplo do modelo de regressão, melhores resultados para o grupo de maturação precoce. O modelo de Jensen reduzido, se torna um modelo potencial, porém, sem

TABELA 3 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de regressão completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. Taquari/RS. 1975/76-1989/90

Modelo	coeficiente	Grupo precoce			Grupo Normal		
		estimativa	p	R ²	estimativa	p	R ²
Completo	a	-0,3340	0,1882	0,888	-0,2186	0,5094	0,834
	b1	0,1118	0,7034		-0,0517	0,8919	
	b2	0,0865	0,5016		0,3253	0,0802	
	b3	1,1802	0,0001		0,9163	0,0001	
	b4	0,0457	0,6890		0,2351	0,1055	
Reduzido	a	-0,1809	0,0028	0,883	1,1428	0,0001	0,792
	b3	1,2431	0,0001				

X1 = variável ETr/ETm no período EM-30EM; X2 = variável ETr/ETm no período 30EM-IP;
X3 = variável ETr/ETm no período IP-30 IP; X4 = variável ETr/ETm no período 30 IP-MF.

EM = emergência; 30EM = 30 dias após EM; IP = início do pendoamento; 30 IP = 30 dias após IP;
MF = maturação fisiológica.

TABELA 4 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de Jensen completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. Taquari/RS. 1975/76-1989/90

Modelo	expoente	Grupo precoce			Grupo normal		
		estimativa	p	R ²	estimativa	p	R ²
Completo	λ 1	-0,3112	NS	0,867	-0,7892	NS	0,789
	λ 2	0,0232	NS		0,2433	NS	
	λ 3	1,2022	**		0,7459	**	
	λ 4	0,0131	NS		0,0650	NS	
Reduzido	λ 3	1,1278	**	0,859	0,7456	**	0,742

** significativo ao nível de 1%

NS – não significativo

intercepto. Por este motivo, os coeficientes de determinação para o ajuste do modelo de Jensen reduzido, são diferentes dos encontrados para o modelo potencial ajustado na análise de regressão simples por MATZENAUER et al., 1995.

Para a localidade de São Borja, os resultados também mostram os menores níveis de significância para os coeficientes da variável X3 (Tabelas 5 e 6). Para o modelo de regressão múltipla, a forma reduzida apresentou coeficientes de determinação próximos aos verificados para o modelo completo, para os dois grupos de maturação, indicando a grande sensibilidade da cultura à disponibilidade hídrica, durante o período de floração e início de enchimento de grãos. O ajuste do modelo de Jensen, apresentou coeficientes de determinação menores, mas próximos aos obtidos para o modelo de regressão. Os valores do parâmetro λ_3 estimados para os grupos de maturação precoce e normal, respectivamente 1,4215 e 1,5279 (Tabela 6), se aproximam do valor de λ estimado por MEYER et al., (1993) durante o período que

abrange o espigamento e início de enchimento de grãos da cultura do milho, que foi de 1,539.

Para São Borja, foram verificados os melhores ajustes para os modelos testados, com coeficientes de determinação maiores que 0,90. O modelo de regressão reduzido explicou 94,8% da variação do rendimento de grãos, para o grupo de maturação precoce, e 96,7% para o grupo de maturação normal, mostrando a grande dependência da cultura do milho à disponibilidade hídrica para as condições de São Borja. Os coeficientes de determinação obtidos para a forma reduzida do modelo de regressão são iguais aos verificados na análise de regressão entre o rendimento relativo e o índice ETr/ETm, durante o período IP-30 IP (MATZENAUER et al., 1995), uma vez que os dados se ajustaram melhor à função linear.

Os resultados para o modelo de regressão em Santo Augusto, diferem dos apresentados anteriormente, uma vez que, além do coeficiente da variável X3 (b3), também os coeficientes b2 e b4, para o grupo de maturação precoce, e b1, b2 e b4, para o grupo de maturação normal, fo-

TABELA 5 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de regressão completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. São Borja/RS. 1978/79-1981/82

Modelo	coeficiente	Grupo precoce			Grupo normal		
		estimativa	p	R ²	estimativa	p	R ²
Completo	a	-0,1467	0,7155	0,976	0,0698	0,8552	0,976
	b1	-0,2674	0,5591		-0,4485	0,3205	
	b2	0,0963	0,6038		0,0976	0,5641	
	b3	1,2414	0,0001		1,2300	0,0001	
	b4	0,2473	0,0177		0,1423	0,1333	
Reduzido	a	-0,2421	0,0013	0,948	-0,2039	0,0003	0,967
	b3	1,3076	0,0001		1,2613	0,0001	

X1 = variável ETr/ETm no período EM-30EM; X2 = variável ETr/ETm no período 30EM-IP;

X3 = variável ETr/ETm no período IP-30 IP; X4 = variável ETr/ETm no período 30 IP-MF.

EM = emergência; 30EM = 30 dias após EM; IP = início do pendoamento; 30 IP = 30 dias após IP;

MF = maturação fisiológica.

TABELA 6 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de Jensen completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. São Borja/RS. 1978/79-1981/82

Modelo	expoente	Grupo precoce			Grupo normal		
		estimativa	p	R ²	estimativa	p	R ²
Completo	λ_1	-1,2735	NS	0,940	-1,8901	NS	0,966
	λ_2	-0,3946	NS		-0,0997	NS	
	λ_3	1,4215	**		1,5279	**	
	λ_4	0,1765	NS		0,1359	NS	
Reduzido	λ_3	1,3050	**	0,911	1,3022	**	0,938

** significativo ao nível de 1%

NS – não significativo

ram significativos (Tabela 7). Neste caso, o consumo relativo de água exerceu efeito sobre o rendimento de grãos também em outros períodos de desenvolvimento da cultura. No entanto, o maior efeito ainda foi observado durante o período de floração e enchimento de grãos, já que os valores de R^2 foram maiores que 0,80 para o modelo reduzido, para os dois grupos de maturação.

Devido à significância dos coeficientes b1, b2 e b4, ajustou-se, também, o modelo de regressão com as variáveis X1 a X3. No entanto, apenas o coeficiente b1 para o grupo de maturação normal apresentou significância estatística. O ajuste do modelo com estas três variáveis pouco melhorou em relação ao modelo somente com a variável X3. Além disso, em termos práticos, o modelo reduzido é mais indicado para utilização na previsão de rendimentos, uma vez que só utiliza a variável ETr/ETm em um período de 30 dias (período crítico da cultura), com uma antecedência de cerca de um mês da maturação fisiológica.

O modelo de Jensen não apresentou a mesma qualidade de ajuste que o modelo de regressão, já que os coeficientes de determinação foram mais baixos, principalmente para o modelo completo (Tabela 8).

Para a localidade de Veranópolis, verifica-se que os dois modelos testados apresentaram ajustes semelhantes, para o grupo de maturação normal (Tabelas 9 e 10). Para o grupo de maturação precoce, o modelo de regressão apresentou melhores resultados, com valores para os coeficientes de determinação de 0,844 e 0,821 para as formas completa e reduzida, respectivamente. Verifica-se que, para os dois modelos testados e para os dois grupos de maturação, somente os coeficientes da variável X3 foram estatisticamente significativos.

Nas análises de regressão, entre o rendimento relativo de grãos e o consumo relativo de água realizadas para Veranópolis (MATZENAUER et al., 1995), o modelo potencial foi o que melhor ajuste apresentou para os dois grupos de maturação, com valores de R^2 de 0,86 e

TABELA 7 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de regressão completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. Santo Augusto/RS. 1975/76-1980/81

Modelo	coeficiente	Grupo precoce			Grupo normal		
		estimativa	p	R^2	estimativa	p	R^2
Completo	a	-0,0256	0,9314	0,883	-0,0101	0,9752	0,880
	b1	-0,6798	0,0671		-0,8005	0,0422	
	b2	0,6644	0,0238		0,8031	0,0104	
	b3	0,7745	0,0002		0,7962	0,0003	
	b4	0,3842	0,0076		0,3543	0,0371	
Reduzido	b3	1,0281	0,0001	0,800	1,0403	0,0001	0,800
Reduzido	b1	-0,3119	0,1310	0,827	-0,4491	0,0193	0,848
	b2	0,2693	0,3357		0,4683	0,0796	
	b3	1,1174	0,0001		1,0908	0,0001	

X1 = variável ETr/ETm no período EM-30EM; X2 = variável ETr/ETm no período 30EM-IP;

X3 = variável ETr/ETm no período IP-30 IP; X4 = variável ETr/ETm no período 30 IP-MF.

EM = emergência; 30 EM = 30 dias após EM; IP = início do pendramento; 30 IP = 30 dias após IP;

MF = maturação fisiológica.

TABELA 8 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de Jensen completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. Santo Augusto/RS. 1975/76-1980/81

Modelo	expoente	Grupo precoce			Grupo normal		
		estimativa	p	R^2	estimativa	p	R^2
Completo	λ 1	-0,5819	NS	0,839	-0,8284	NS	0,829
	λ 2	0,3210	NS		0,4235	NS	
	λ 3	0,7420	**		0,8048	**	
	λ 4	0,2575	NS		0,2156	NS	
Reduzido	λ 3	0,9971	**	0,794	0,9949	**	0,789

** significativo ao nível de 1%

NS – não significativo

0,84. Na comparação com o modelo reduzido de Jensen, que é um modelo potencial sem intercepto, verificou-se valores de R^2 de 0,76 e 0,69, respectivamente para o grupo precoce e normal, portanto, bem mais baixos que os obtidos no modelo de regressão potencial, caracterizando o efeito significativo do intercepto

neste caso. Resultado semelhante foi encontrado para Taquari.

ANÁLISE GERAL

Nas Tabelas 11 e 12, são apresentados os resultados da análise envolvendo os quatro lo-

TABELA 9 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de regressão completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. Veranópolis/RS.1979/80-1989/90

Modelo	coeficiente	Grupo precoce			Grupo normal		
		estimativa	p	R^2	estimativa	p	R^2
Completo	a	-0,2014	0,3291	0,844	0,0076	0,9776	0,706
	b1	-0,2384	0,3622		-0,0186	0,9522	
	b2	-0,1723	0,5479		0,0431	0,8999	
	b3	1,5445	0,0001		1,0756	0,0015	
	b4	0,1968	0,3081		-0,0250	0,9143	
Reduzido	a	-0,3032	0,0105	0,821			
	b3	1,4197	0,0001		1,0802	0,0001	0,705

X1 = variável ETr/ETm no período EM-30EM; X2 = variável ETr/ETm no período 30EM-IP;

X3 = variável ETr/ETm no período IP-30 IP; X4 = variável ETr/ETm no período 30 IP-MF.

EM = emergência; 30EM = 30 dias após EM; IP = início do pendoamento; 30 IP = 30 dias após IP;

MF = maturação fisiológica.

TABELA 10 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de Jensen completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. Veranópolis/RS. 1979/80-1989/90

Modelo	expoente	Grupo precoce			Grupo normal		
		estimativa	p	R^2	estimativa	p	R^2
Completo	λ 1	-0,4528	NS	0,786	0,0236	NS	0,703
	λ 2	0,1444	NS		-0,1024	NS	
	λ 3	1,4516	**		0,9577	**	
	λ 4	-0,0238	NS		-0,1248	NS	
Reduzido	λ 3	1,1395	**	0,764	0,8229	**	0,693

** significativo ao nível de 1%

NS – não significativo

TABELA 11 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de regressão completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. Análise geral dos quatro locais.1975/76-1989/90

Modelo	coeficiente	Grupo precoce			Grupo normal		
		estimativa	p	R^2	estimativa	p	R^2
Completo	a	-0,1039	0,5117	0,737	-0,0664	0,7002	0,766
	b1	-0,2205	0,2409		-0,2842	0,1625	
	b2	0,1728	0,1893		0,2545	0,0901	
	b3	0,8267	0,0001		0,9627	0,0001	
	b4	0,1998	0,0056		0,1875	0,0270	
Reduzido	a	-0,1318	0,0136	0,699	-0,1081	0,0481	0,742
	b3	0,9820	0,0001		1,1428	0,0001	

X1 = variável ETr/ETm no período EM-30EM; X2 = variável ETr/ETm no período 30EM-IP;

X3 = variável ETr/ETm no período IP-30 IP; X4 = variável ETr/ETm no período 30 IP-MF.

EM = emergência; 30EM = 30 dias após EM; IP = início do pendoamento; 30 IP = 30 dias após IP;

MF = maturação fisiológica.

cais, para os dois modelos testados e para os dois grupos de maturação. Excluindo-se os menores coeficientes de determinação encontrados para os modelos de regressão e de Jensen, para o grupo de maturação normal na localidade de Veranópolis, os modelos ajustados na análise geral não apresentaram a mesma performance, quando comparados com as análises individuais. Os coeficientes de determinação encontrados para o modelo de Jensen foram levemente inferiores aos verificados para o modelo de regressão múltipla, caracterizando o bom desempenho obtido para os dois modelos ajustados. O modelo de regressão completo explicou 73,7% da variação do rendimento relativo de grãos para o grupo de maturação precoce e, 76,6% para o grupo de maturação normal, enquanto que o modelo na forma reduzida explicou cerca de 3% menos.

Apesar da significância estatística do coeficiente b_4 para o modelo de regressão, nos dois grupos de maturação (Tabela 11), o consumo relativo de água exerce pouco efeito sobre o rendimento de grãos no final do período reprodutivo. Para o modelo de Jensen, o expoente λ_4 também foi significativo, para o grupo de maturação precoce.

Na análise geral, observa-se um aumento na dispersão dos dados, determinando valores mais baixos para os coeficientes de determinação, em relação às análises individuais. Vários fatores podem ter contribuído para isto. Entre os fatores que influenciam a relação água-rendimento, as características dos materiais genéticos utilizados e as condições sob as quais a cultura foi conduzida, podem ser os de maior influência sobre a variabilidade dos resultados. Para minimizar o efeito da variabilidade devida ao potencial genético dos híbridos, procurou-se

utilizar materiais com características semelhantes em cada grupo de maturação. Além disso, utilizando o rendimento médio de dois ou mais híbridos, procurou-se minimizar o efeito da variabilidade, tornando a amostra mais representativa.

Dos quatro locais utilizados nas análises de regressão e no ajuste dos modelos, parte dos dados coletados em Taquari foi oriunda de experimentos irrigados (período 1975/76 a 1978/79), podendo ter aumentado a variabilidade, uma vez que os efeitos de uma chuva e de uma irrigação não são os mesmos, devido às diferentes condições ambientais ocorridas em cada situação. Este fato, aliado às diferentes condições de clima e solo entre os locais, justificou a análise individual dos dados experimentais, numa primeira etapa.

Segundo MUSICK e DUSEK (1971), a maior causa da variação dos rendimentos está associada ao número, distribuição temporal e magnitude das irrigações, bem como à quantidade e distribuição das chuvas.

A ampla faixa de semeadura utilizada, com aproximadamente três meses de amplitude, também pode ter contribuído para uma maior variação do efeito do déficit hídrico sobre o rendimento de grãos, devido às interações com outros elementos, como radiação solar e temperatura.

Além disso, apesar de procurar-se manter um padrão uniforme na condução e manejo da cultura nos diferentes locais e anos de experimentação, podem ter ocorrido variações em função da adoção e aplicação das práticas de manejo, sendo os seus efeitos difíceis de quantificar.

Além da variabilidade espacial de ambiente, principalmente das condições meteorológicas

TABELA 12 – Estatísticas dos parâmetros estimados para o modelo de Jensen completo (X1 até X4) e reduzido (X3) para os grupos de maturação de milho precoce e normal. Análise geral dos quatro locais. 1975/76-1989/90

Modelo	expoente	Grupo precoce			Grupo normal		
		estimativa	p	R ²	estimativa	p	R ²
Completo	λ_1	-0,1692	NS	0,713	-0,3265	NS	0,748
	λ_2	0,3542	NS		0,1681	NS	
	λ_3	1,1630	**		0,9500	**	
	λ_4	0,2544	NS		0,1343	NS	
Reduzido	λ_3	1,6111	**	0,656	1,0722	**	0,731

** significativo ao nível de 1%

NS – não significativo

e das características físico-hídricas dos solos, como capacidade de infiltração e retenção de água, outras fontes de variação como a variabilidade temporal devida às condições de solo, pela alteração nas práticas de manejo e pelo melhoramento genético, podem ter exercido efeitos sobre o rendimento de grãos. Estes efeitos da variabilidade temporal sobre a resposta das plantas é denominado efeito da variação tecnológica ou tendência tecnológica, que exerce maior influência sobre as relações planta-clima à medida que aumenta o período experimental utilizado nas análises. Alguns pesquisadores têm trabalhado no sentido de quantificar o efeito da tendência tecnológica em modelos de previsão de rendimento (CHEN e FONSECA, 1980; MOTA, 1983; CUELLAR et al., 1991), obtendo bons resultados.

Avaliação dos modelos ajustados

Na Tabela 13, são apresentadas algumas estatísticas para as relações entre o rendimento relativo de grãos observado e estimado pelos modelos. Verifica-se que as melhores estatísticas foram obtidas para o modelo de regressão. No entanto, as diferenças encontradas para o modelo de Jensen são pequenas, indicando o bom desempenho encontrado para o ajuste dos dois modelos.

O modelo multiplicativo de Jensen pressupõe que as variáveis independentes estejam interligadas, ou seja, que um déficit hídrico imposto em um determinado período do ciclo da cultura exerça influência em um período consecutivo. O modelo de regressão múltipla (aditivo), por sua vez, pressupõe que ocorre independên-

TABELA 13 – Valores do coeficiente de regressão (b), do desvio padrão dos erros de estimativa (S) e do coeficiente de correlação (r), para a relação entre rendimento relativo de grãos observado e rendimento relativo de grãos estimado pelos modelos de regressão e de Jensen (completo e reduzido) para os quatro locais e para a análise geral

LOCAL	G* r u p o	F** o r m a	Modelo de regressão			Modelo de Jensen		
			b	s	r	b	s	r
Taquari	P	C	1,000	0,074	0,942	1,016	0,081	0,932
		R	1,000	0,076	0,940	1,024	0,082	0,930
	N	C	1,000	0,098	0,913	1,017	0,109	0,890
		R	1,000	0,110	0,890	1,039	0,116	0,869
São Borja	P	C	1,000	0,052	0,988	1,023	0,078	0,971
		R	1,000	0,078	0,974	1,056	0,092	0,960
	N	C	1,000	0,052	0,988	1,022	0,058	0,984
		R	1,000	0,061	0,983	1,059	0,075	0,973
Santo Augusto	P	C	1,001	0,100	0,940	1,021	0,118	0,917
		R	1,001	0,132	0,894	1,028	0,133	0,893
Veranópolis	N	C	1,000	0,110	0,938	1,024	0,131	0,912
		R	1,001	0,144	0,894	1,039	0,144	0,892
	P	C	1,000	0,105	0,919	1,039	0,120	0,892
		R	1,000	0,112	0,906	1,045	0,125	0,882
Geral	N	C	1,000	0,126	0,840	1,012	0,126	0,839
		R	1,000	0,126	0,840	1,021	0,128	0,835
	P	C	1,001	0,114	0,858	0,979	0,120	0,846
		R	1,001	0,123	0,836	0,959	0,130	0,816
Geral	N	C	1,000	0,128	0,875	1,014	0,133	0,865
		R	1,000	0,135	0,861	1,011	0,138	0,855

* Grupo de maturação: P – precoce; N – normal.

** C-forma completa do modelo (X1 a X4); R-forma reduzida do modelo (X3).

cia entre as variáveis, nos diferentes períodos. Biologicamente, o modelo multiplicativo parece adequar-se melhor às respostas das plantas à disponibilidade hídrica, já que os processos fisiológicos ocorrem de forma contínua, não apresentando independência entre os diferentes períodos de desenvolvimento da cultura. No entanto, os resultados obtidos caracterizam, claramente, o período compreendido entre o início do pendoamento e 30 dias após, como o mais sensível em relação ao déficit hídrico, confirmando resultados obtidos por diversos pesquisadores (ROBINS e DOMINGO, 1953; DENMEAD e SHAW, 1960; CLASSEN e SHAW, 1970; GRANT et al., 1989), segundo os quais o período crítico do milho se situa dentro dos limites utilizados neste trabalho. Pelo fato de apresentar período crítico bastante definido e com grande sensibilidade ao déficit hídrico, o modelo multiplicativo de Jensen não mostrou vantagens sobre o modelo aditivo, já que na maioria das situações avaliadas, os modelos utilizados na forma reduzida explicam praticamente a mesma variação de rendimento que os modelos na forma completa.

Os elevados coeficientes de correlação encontrados na aferição dos modelos, comprovam o efeito significativo que o déficit hídrico exerce sobre as variações de rendimento de grãos da cultura do milho, no Estado do Rio Grande do Sul.

Alguns pesquisadores têm trabalhado no sentido de caracterizar ou quantificar o efeito da disponibilidade hídrica para algumas culturas no Estado.

AGUINSKI (1991), ajustando modelos para estimativa do rendimento relativo de grãos de milho, utilizando como variável independente a precipitação efetiva durante diferentes períodos de desenvolvimento do milho, para quatro localidades, encontrou valores $r = 0,90$ e $r = 0,94$ para o modelo aditivo e multiplicativo, respectivamente.

BERLATO (1987) relacionou o rendimento relativo da soja, com o índice E_{Tr}/E_{To} (evapotranspiração real em relação à evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman) em quatro períodos de desenvolvimento da cultura, utilizando o modelo multiplicativo de Jensen, para dois grupos de maturação

(grupo precoce+médio e grupo tardio), encontrando valores muito significativos para a correlação entre o rendimento observado e estimado pelo modelo ($r = 0,93$ e $r = 0,92$ respectivamente para o grupo precoce+médio e o grupo tardio).

BARNI (1994) relacionou o rendimento relativo de grãos de distintos grupos de maturação do girassol com o índice E_{Tr}/E_{To} , em diferentes períodos de desenvolvimento da cultura, para diversas localidades, utilizando o modelo multiplicativo de Jensen. Encontrou coeficientes de determinação que variaram, para as diferentes situações, entre 0,84 e 0,96 no ajuste do modelo completo e de 0,73 a 0,91, no modelo somente com o índice hídrico, no período compreendido entre a iniciação do botão floral e o final do florescimento.

Os dados apresentados, envolvendo diferentes épocas de semeadura, locais e culturas evidenciam claramente, o problema da deficiência hídrica para as culturas de primavera-verão, no Estado do Rio Grande do Sul, apesar das diferenças nos trabalhos realizados, principalmente entre a fisiologia das culturas e as variáveis independentes utilizadas, fica evidente que o déficit hídrico é um dos fatores que tem causado maiores prejuízos à safras de verão no Estado.

Validação dos modelos

Nas Figuras 1 e 2, são apresentados os resultados da validação dos modelos de regressão e de Jensen, respectivamente, nas formas completa e reduzida, para os dois grupos de maturação. O teste dos modelos foi realizado a partir dos parâmetros ajustados na análise geral (Tabelas 11 e 12), utilizando-se um conjunto de dados independentes. Os coeficientes de correlação obtidos, na relação entre o rendimento relativo de grãos observado e o rendimento relativo previsto pelos modelos, são superiores para o modelo de regressão, com valores do desvio padrão dos erros de estimativa inferiores (Tabela 14). Comparando-se a distribuição dos pontos nas Figuras 1 e 2, verifica-se uma tendência de superestimativa do modelo de Jensen para os baixos valores de rendimento relativo, confirmando o que foi constatado por ocasião da aferição dos modelos. Observa-se, também, para o

grupo de maturação normal, uma tendência de subestimativa dos valores mais elevados de rendimento relativo, para os dois modelos testados. Na validação do modelo de Jensen para diferentes grupos de maturação da soja, BERLATO (1987) também observou uma tendência de subestimativa para os valores mais elevados de rendimento relativo de grãos. Apesar disso, pode-se dizer que os modelos apresentam bom desempenho na estimativa do rendimento relativo de grãos para a cultura do milho, considerando-se os valores dos coeficientes de correlação obtidos, com um desvio padrão dos erros de estimativa próximo a 10%. Uma observação interessante, é que os coeficientes de correlação obtidos na validação dos modelos, na sua forma reduzida, foram maiores do que os obtidos na forma completa, para todos os casos testados, apresentando, também, menores valores de desvio padrão. Este resultado confirma o desempenho obtido no ajuste da forma reduzida dos modelos, constituindo-se numa adequada alternativa para utilização na estimativa do rendimento relativo de milho. A possibilidade de uso dos modelos na forma reduzida apresenta duas grandes vantagens: uma delas é que o cálculo do índice hídrico deve ser feito apenas no período 3 (IP-30 IP) e a outra, é que o modelo pode ser utilizado na previsão do rendimento relativo com uma antecedência aproximada de 30 dias da maturação fisiológica da cultura do milho, podendo ser utilizado como uma ferramenta útil na previsão de safras.

Uma limitação que os modelos apresentam, é a introdução e/ou melhoramento genético de cultivares com características hídricas diferentes, com maior ou menor tolerância ao déficit hídrico. Neste sentido, os modelos ajustados poderão servir de base para a identificação de materiais com maior tolerância ao déficit hídrico, bem como efetuar diagnóstico de lavouras, com o objetivo de minimizar prejuízos causados pela falta de água à cultura do milho, no Estado do Rio Grande do Sul.

CONCLUSÕES

1. O consumo relativo de água (índice ETr/ETm) é uma variável eficiente para indicar as variações de rendimento de grãos de milho entre épocas de semeadura, anos e locais 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. Os modelos de regressão linear múltipla e de Jensen, que utilizam como variável independente o consumo relativo de água, podem ser utilizados para a estimativa do rendimento de grãos da cultura do milho.

4. O ajuste dos modelos na forma reduzida (consumo relativo de água somente no período crítico) apresenta bom desempenho, constituindo-se numa alternativa prática para a previsão de rendimentos de grãos de milho.

TABELA 14 – Valores do coeficiente de regressão (b), desvio padrão dos erros de estimativa (S) e coeficiente de correlação (r), para a relação entre rendimento relativo de grãos observado e rendimento relativo de grãos previsto (validação) pelos modelos de regressão e de Jensen (completo e reduzido), para os grupos de maturação de milho precoce e normal

Modelo	Grupo*	Forma**	b	S	r
Regressão	P	C	1,029	0,107	0,903
		R	1,036	0,097	0,922
	N	C	1,061	0,104	0,940
		R	1,064	0,099	0,946
Jensen	P	C	1,006	0,112	0,893
		R	0,999	0,100	0,915
	N	C	1,070	0,108	0,936
		R	1,077	0,102	0,943

* Grupo de maturação: P-precoce; N-normal.

** C-forma completa do modelo (X1 a X4);

R-forma reduzida do modelo (X3).

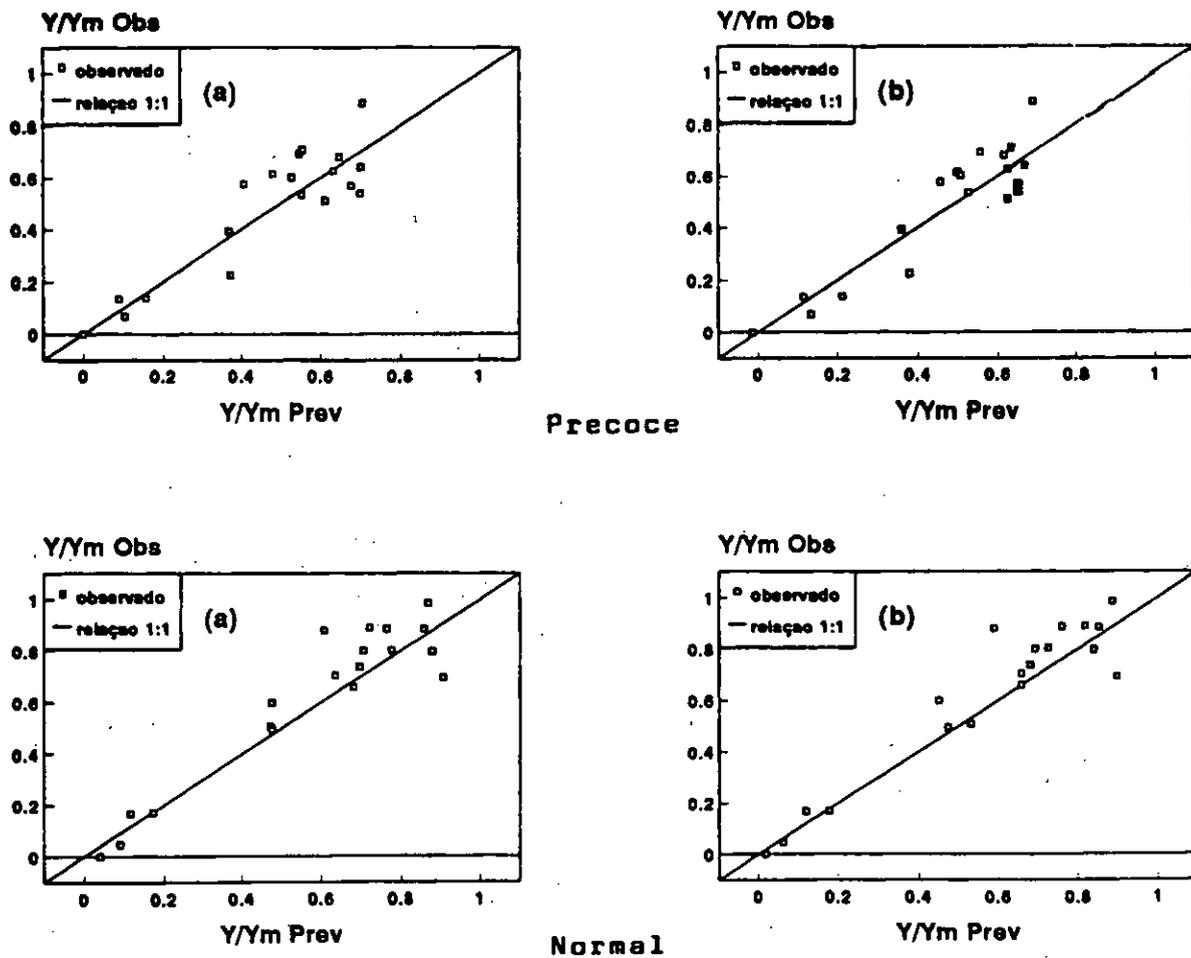


FIGURA 1 – Relação entre rendimento relativo de grãos observado (y/ym obs) e previsto (y/ym prev) pelo modelo de regressão completo (a) e reduzido (b), para os grupos de maturação de milho precoce e normal

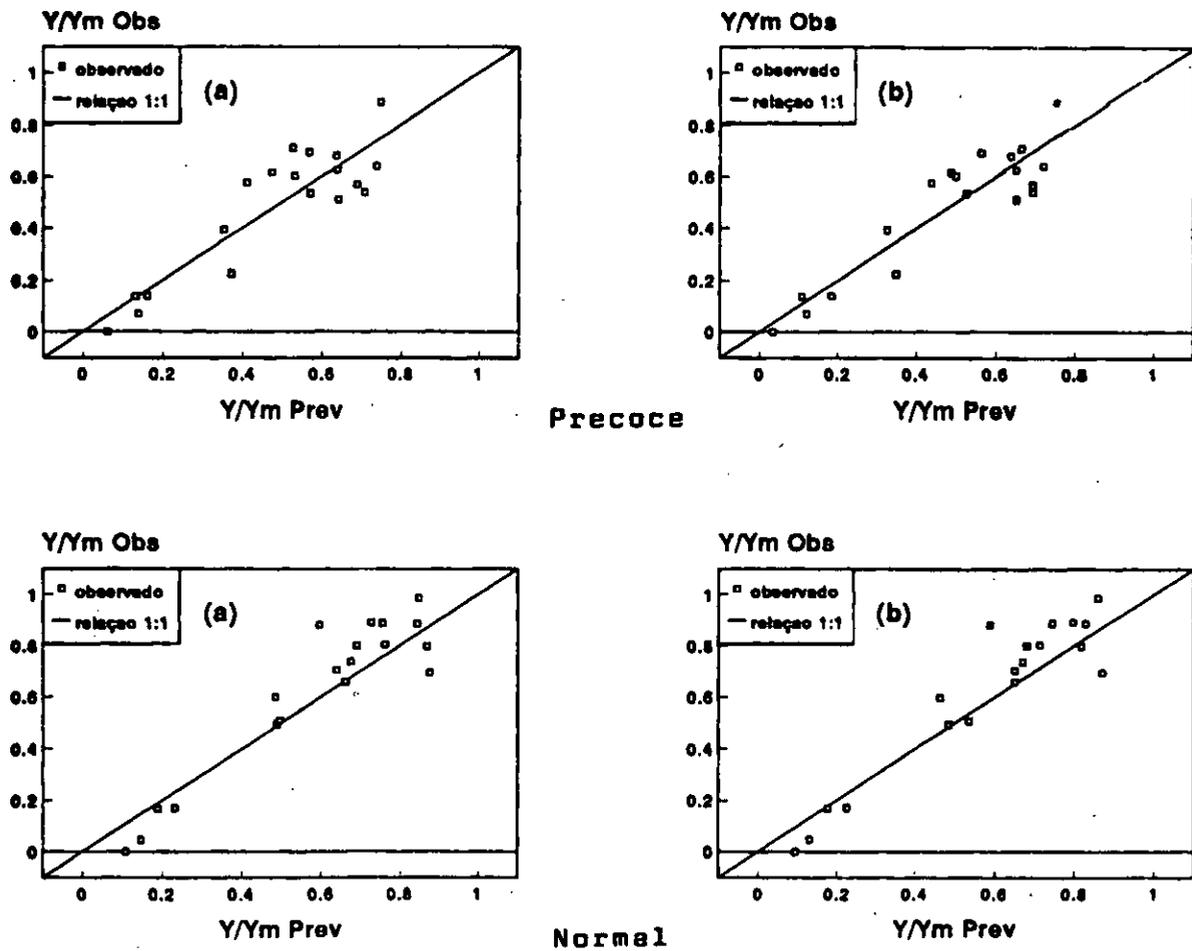


FIGURA 2 – Relação entre rendimento relativo de grãos observado (y/ym obs) e previsto (y/ym prev) pelo modelo de Jensen completo (a) e reduzido (b) para os grupos de maturação de milho precoce e normal

BIBLIOGRAFIA CITADA

- AGUINSKY, S.D. **Prognóstico e otimização do rendimento do milho (*Zea mays L.*) no Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 1991. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, 1991. 196p.
- BAIER, W. Crop-weather analysis model: review and model development. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v. 12, p.937-947, 1973.
- BAIER, W. Note on the terminology of crop-weather models. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v. 20, p. 137-145, 1979.
- BARNI, N.A. **Modelos de crescimento, desenvolvimento e rendimento do girassol em função da radiação global, temperatura e disponibilidade hídrica.** Porto Alegre, 1994. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Departamento de Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1994. 249 p.
- BEGG, J.E.; TURNER, N.C. Crop water deficits. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 28, p. 161-217, 1976.
- BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.) **Agrometeorologia aplicada à irrigação.** Porto Alegre: Editora da Universidade-UFRGS, 1992. p.25-32.
- BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul.** São José dos Campos, 1987. Tese (Doutorado em Meteorologia) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1987. 93p.
- 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, 1992. p.11-24.
- CAMARGO, M.B.P. de; HUBBARD, K. Desenvolvimento de modelo de monitoramento agrometeorológico para estimativa da produtividade do sorgo no Estado de Nebraska-EUA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 8, Porto Alegre, 1993. **Resumos...**Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1993. p.135.
- CHEN, S.C.; FONSECA, L.B. Corn yield model for Ribeirão Preto, São Paulo State, Brazil. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.12, p.341-349, 1980.
- CLAASSEN M.M.; SHAW, R.H. Water deficits effects on corn. II: grain components. *Agronomy Journal*, Madison, v. 62, p.652-655, 1970.
- CUELAR, V.E.; COSTA, J.N.; COELHO, D.T.; GALVÃO, J.D. Estimativa da produtividade da cultura de milho em Viçosa – MG, baseada em variáveis agroclimáticas e tendência tecnológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7, Viçosa, 1991. **Resumos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, UFV, 1991. p.241-244.
- 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, 1992. p.85-97.
- 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.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos.** Roma: FAO, 1979. 212p. (Riego y drenage, 33).
- FRERE, M.; POPOV, G.F. **Pronóstico de cosechas basado en datos agrometeorológicos.** Roma: FAO, 1980. 66p. (Producción y protección vegetal, 17).
- GRANT, R.F.; JACKSON, B.S.; KINIRY, J.R.; ARKIN, G.F. Water deficit timing effects on yield components in mayze. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, n. 1, p.61-65, 1989.
- HANKS, R.J. Model predicting plant yield as influenced by water use. *Agronomy Journal*, Madison, v. 66, p.660-665, 1974.
- HANKS, R.J.; RASMUSSEN, V.P. Predicting crop production as related to plant water stress. *Advances in Agronomy*, New York, v. 35, p. 193-215, 1982.
- JENSEN, M.E. Water consumptions by agricultural plants. In: KOZLOWSKY, T.T.; (Ed.) **Water deficits and plant growth.** New York: Academic Press, 1968. v.2, p.1-22.
- KRAMER, P.J. **Plant and soil water relationships: a modern synthesis.** New York: McGraw Hill, 1969. 482p.
- LIU, W.T.; BOTNER, D.M.; SAKAMOTO, C.M. Application of Ceres mayze model to yield prediction of a Brazilian mayze hibrid. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.45, p.229-312, 1989.
- LIU, W.T.; LIU, B.W.Y. Comparação de modelo simples e composto de previsão de safra de soja no Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5, Belém, 1987. **Coletânea de Trabalhos** Belém: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1987. p. 10-20.
- 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, 1981, p.102-105.
- 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 global, em três épocas de semeadura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 8, Porto Alegre, 1993. **Resumos ...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1993. p.81.
- MATZENAUER, R. **Modelos Agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 1994. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Departamento de Fitotecnia Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1994. 172p.
- MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; RIBOLDI, J. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.3, 85-92. 1995.
- MEDEIROS, S.L.P.; WESTPHALEN, S.L.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Relações entre evapotranspiração e rendimento de grãos de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília. v.26, n.1-10, 1991.
- MEYER, S.J.; HUBBARD, K.G.; WILHITE, D.A. A crop-specific frought index for corn: I. Model development and validation. *Agronomy Journal*, Madison, v.85, p.388-395, 1993.

- MOTA, F.S.** Weather technology models for corn and soybeans in the south of Brazil. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.23, p.49-64, 1983.
- MUSICK, J.T.; DUSEK, D.A.** Grain sorghum response to number, timing and size of irrigation in the Southern High Plains. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v. 14, n.3, p.401-404, 1971.
- NELSON, W.L.; DALE, R.F.** Effect of trend or technology variables and record period on prediction of corn yields with weather variables. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v. 177, p.926-933, 1978.
- PENMAN, H.L.** Evaporation: an introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Wageningen, v. 4, p.9-29, 1956.
- RAO, N.H.; SARMA, P.B.S.; CHANDER, S.** A simple dated water production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 13, p. 25-32, 1988.
- 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.
- SALTER, P.J.; GOODE, J.E.** **Crop responses to water at different stages of growth.** Farnham Royal: Commonwealth Agricultural Bureau, 1967. 246p.
- SIQUEIRA, O.J.F.; BERG, M.** Van Den. Validação do modelo de simulação SOYGRO-Soja. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 19, Pelotas, 1991. **Soja, resultados de pesquisa 1990-1991.** Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1991. p. 139-144.
- THOMPSON, L.M.** Weather and technology in the production of corn in the U.S. corn Belt. *Agronomy Journal*, Madison, v. 61, p.453-456, 1969.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R.** The water budget and its use in irrigation. *Yearbook of Agriculture*, Washington, D.C. p. 346-358, 1955.
- TSCHENCHKE, P.D.; GILLEY, J.R.** Status and verification of Nebraska's corn growth Model CORNGRO. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v. 22, n. 6, p.1329-1337, 1979.
- WITT, C.T.** Transpiration and crop yield. *The Netherlands, Verse-Landbowk, Onder Z*, n.64, 6-S, 1958.