

UM MODELO MATEMÁTICO DE QUANTIFICAÇÃO DO EFEITO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM SOJA¹

EMILSON FRANÇA DE QUEIROZ², LUIZ CARLOS BALDICERO MOLION³,
HARRY CAMERON MINOR⁴ e NORMAN NEUMAIER⁵

RESUMO - Utilizando resultados de experimento instalado com as cultivares de soja Paraná, Bossier e Santa Rosa, plantadas em quatro épocas (10/10; 10/11; 10/12 e 10/01) durante os anos-agrícolas 1976/77 a 1983/84, foi derivado um modelo matemático que quantifica o efeito da oferta hídrica sobre a resposta da soja à época de plantio. O modelo indicou os períodos críticos de deficiência hídrica, e explicou 52,1%, 57,9% e 58,0% da variação total observada nas cultivares Paraná, Bossier e Santa Rosa, respectivamente. O modelo selecionou o subperíodo R1 - R4, como o mais crítico para deficiência hídrica, no caso da cultivar Paraná. No que se refere às cultivares Bossier e Santa Rosa, o modelo selecionou os subperíodos R1 - R4 e R4 - R6, como os mais críticos para deficiência hídrica.

Termos para indexação: agrometeorologia, época de plantio, deficiência hídrica.

A MATHEMATICAL MODEL TO QUANTIFY THE EFFECT OF WATER AVAILABILITY ON SOYBEAN

ABSTRACT - Utilizing results of an experiment carried out with the soybean cultivars Paraná, Bossier and Santa Rosa, planted on four planting times (10/10; 11/10; 12/10 and 01/10) through the agricultural years 1976/77 to 1983/84, a mathematical model which quantifies the effect of water availability on soybean response to planting time was developed. The model indicated the critical periods for water deficiency and explained 52.1%, 57.9% and 58.0% of the total variation observed in cultivars Paraná, Bossier and Santa Rosa, respectively. For the cultivar "Paraná", the subperiod R1 - R4 was selected by the model as the most critical one for water deficiency. For "Bossier" and "Santa Rosa" cultivars, the model selected the periods R1 - R4 and R4 - R6 as the most critical for water deficiency.

Index terms: agrometeorology, planting time, water deficiency.

INTRODUÇÃO

Os impactos de adversidades climáticas, especialmente de anomalias negativas da precipitação, sobre a produção brasileira de soja, tornaram-se

largamente conhecidos em função da magnitude de suas conseqüências econômicas. Entretanto, não existe relação linear entre a intensidade do evento e o seu efeito. Como é natural, a intensidade dos efeitos é dependente, entre outros fatores, do estágio no qual a lavoura foi atingida.

O desenvolvimento de tecnologia ou a adoção de medidas práticas, no campo agrícola ou econômico, para minimizar os efeitos das anomalias da precipitação, depende do entendimento e da quantificação do efeito da disponibilidade hídrica sobre o rendimento, em cada estágio da cultura.

A derivação de modelos matemáticos de previsão do rendimento de soja com base em variáveis meteorológicas, além de permitir o entendimento de elementos fundamentais de controle da resposta da planta e a determinação dos estágios críticos

¹ Aceito para publicação em 5 de julho de 1996.

Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada na ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

² Eng. Agr., Dr., Embrapa-DPD, Caixa Postal 04.0315, CEP 70770-901 Brasília, DF.

³ Físico, Meteorologista, Ph.D., INPE, Av. dos Astronautas 1758, Caixa Postal 515, CEP 12227-010 São José dos Campos, SP.

⁴ Eng. Agr., Ph.D., University of Missouri, 214, Waters Hall, 65211, Columbia, Missouri, USA.

⁵ Eng. Agr., Ph.D., Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Soja (CNPSo), Caixa Postal 1061, CEP 86001-970 Londrina, PR.

para o atendimento das exigências hídricas, fornece informações úteis para a previsão e comercialização da safra, bem como para a tomada de decisões referentes ao manejo da cultura. O plantio em época adequada é uma das principais práticas de manejo da cultura utilizadas com o objetivo de se harmonizarem as exigências bioclimáticas da soja com as disponibilidades climáticas de uma região, visando à produção do rendimento máximo.

Ueda, citado por Howell (1967), encontrou uma correlação positiva do teor de umidade do solo com a altura de planta, número de nós, diâmetro do caule, número de flores, aborto de legumes, número e peso de sementes. Runge & Odell (1960), trabalhando em Illinois, EUA, mostraram que o rendimento está positivamente correlacionado com a precipitação que ocorre no período de enchimento de grãos.

Grisson et al. (1955) obtiveram um aumento de 390 kg/ha, em relação à parcela irrigada, quando aplicaram irrigação depois que 25% da água disponível do solo foi extraída durante o desenvolvimento das sementes.

Shaw & Laing (1965), Doss et al. (1974) e Sionit & Kramer (1977) obtiveram significativa redução do rendimento da soja quando impuseram deficiência hídrica durante o período de enchimento de grãos.

Shaw & Laing (1965) concluíram que a máxima redução do número de vagens por planta ocorreu durante a última semana de desenvolvimento das vagens e durante a formação de grãos, em consequência de deficiência hídrica. Quando a deficiência ocorreu durante a floração e o início da formação de vagens, houve aborto de flores e queda de legumes. A deficiência hídrica ocorrida durante a formação de grãos reduziu o tamanho da semente.

Berlato & Bergamaschi (1979), determinando o consumo estacional de água pela cultura da soja, no Rio Grande do Sul, obtiveram um consumo médio diário de 5,8 mm, no caso da cultivar Bragg. Este consumo, expresso pela evapotranspiração diária, variou desde 2,2 mm no subperíodo plantio-emergência, até o valor máximo de 7,4 mm, atingido no subperíodo compreendido entre o início do florescimento e o máximo surgimento de vagens.

Berlato & Bergamaschi (1979), estudando a relação ET/ET_o, entre a evapotranspiração da soja e a evaporação medida em tanque de evaporação classe A, observaram que os valores máximos ocorreram durante a formação de vagens e grãos de soja.

Buntley et al. (1973), trabalhando em três localidades do Tennessee, EUA, verificaram que as maiores reduções de rendimento ocorreram sempre que a precipitação era menor que a evapotranspiração potencial, durante toda a extensão ou parte do período de enchimento de grãos. Quando ocorreram condições desfavoráveis, com precipitação menor que a evapotranspiração, no início do florescimento, não foram determinadas reduções significativas do rendimento. Rogers (1971) também demonstrou, na Carolina do Sul, EUA, que o período de enchimento de grãos de soja é um período crítico em relação à água, pois determinou a associação entre rendimento e disponibilidade hídrica neste período.

Berlato & Gonçalves (1978) também determinaram uma correlação altamente significativa entre o índice P/ETP e o rendimento de uma cultivar tardia de soja referente ao período de enchimento de grãos (florescimento mais 30 dias). Rendimentos acima da média geral do experimento somente foram obtidos quando a relação P/ETP, no período crítico de enchimento de grãos, foi de 1,6, ou seja, quando a precipitação excedeu a evapotranspiração em cerca de 60%.

Os excessos hídricos poderão modificar o rendimento da soja de formas variáveis: se ocorrerem associados a altas temperaturas e drenagem livre, resultam em elevados rendimentos, como é o caso dos meses de dezembro e janeiro na região norte do Paraná; se a drenagem for insuficiente, a aeração do solo será reduzida, e os rendimentos diminuirão. Os excessos de umidade na maturação e na colheita poderão ser prejudiciais, especialmente se as temperaturas forem superiores a 15°C. Nessas condições, as plantas continuam vegetando, a queda de folhas é atrasada, as sementes não completam a maturação, e as doenças são favorecidas (Pascale, 1969). É freqüente que ocorram estas condições, durante o mês de fevereiro, na região norte do Paraná.

Até certo ponto, as exigências de determinada cultivar podem ser harmonizadas com as disponi-

bilidades climáticas de determinada região, pelo plantio em época adequada.

Em nosso meio, a época de plantio mais aconselhada para a produção de soja está compreendida entre 15 de outubro e 15 de dezembro. Os mais altos rendimentos são obtidos em novembro (Queiroz et al., 1971; Buss et al., 1972; Mota et al., 1973; Bergamaschi et al., 1977; Queiroz et al., 1979).

O presente estudo teve o objetivo de derivar um modelo matemático que quantifique o efeito da disponibilidade hídrica sobre a resposta da soja à época de plantio, na região norte do Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento que serviu de base para este estudo foi conduzido no campo experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Soja, localizado no município de Londrina, e situado na região norte do Estado do Paraná.

No Estado do Paraná, conforme a classificação de Köppen, apresentada por Godoy et al. (1978), ocorrem os tipos climáticos Af, Cfb e Cfa. O clima da região norte do Paraná é do tipo Cfa, mas apresenta uma transição entre o tipo Cfb, que ocorre no centro e sul do Estado, e o tipo Cwa, que ocorre no sul do Estado de São Paulo.

No local de execução do experimento, o solo é classificado como Latossolo Roxo distrófico, bem drenado, profundo, e ocupando um relevo ondulado.

Para atender ao objetivo de estudar a interação entre genótipos e ambientes, as principais variáveis de estudo foram cultivares e épocas de plantio.

Foram estudadas as cultivares Paraná, Bossier e Santa Rosa, consideradas representativas dos Grupos de Maturação VI, VII e VIII, da Classificação Americana de Cultivares de Soja, respectivamente. Estas mesmas cultivares representaram os grupos de cultivares precoce, médio e tardio, segundo a terminologia corrente no Estado do Paraná, e integravam o Ensaio de Épocas de Plantio na Sucessão Trigo-Soja.

O experimento foi instalado em épocas distribuídas desde o início do mês de outubro até o início do mês de janeiro. As datas de plantio planejadas foram: 10/10; 10/11; 10/12 e 10/01. Foi usado o delineamento experimental fatorial em parcelas subdivididas, com as épocas constituindo as parcelas principais. As subparcelas foram as combinações de três cultivares de soja com três cultivares de trigo, sorteadas ao acaso dentro da parcela principal. Admitiu-se a antecipação do plantio de dois a três dias, em relação a estas datas, todas as vezes que ocorreram condições ótimas de umidade do solo para o plantio. Nos casos em que houve

condições de insuficiência hídrica para a emergência, procedeu-se à irrigação para garantir o estabelecimento das populações de plantas por unidade de área desejadas.

A outra fonte de variação ambiental foi a instalação dos experimentos ao longo dos anos agrícolas 1976/77 a 1983/1984.

Procedeu-se à correção de solo, adubação, inoculação de *Bradyrhizobium japonicum* nas sementes e ao controle de invasoras, pragas e moléstias, conforme recomendações das respectivas áreas de pesquisa. Entretanto, sempre foi mantido o objetivo de se obter o máximo controle sobre as variáveis que não foram objeto de estudo.

Determinaram-se as datas de emergência (VE) e as datas de ocorrência de todos os estágios reprodutivos, (R1 a R8) segundo o critério proposto por Fehr et al. (1971).

A produção de grãos por subparcela foi determinada, com precisão de 0,001 quilograma, após a colheita e trilha das plantas da área útil das mesmas.

Com os dados de produção por subparcela, área de subparcela e teor de umidade dos grãos, calculou-se o rendimento por hectare, corrigidos para 13% de umidade, segundo a equação citada por Queiroz (1975).

Para a descrição das condições meteorológicas ocorridas durante o período de execução do experimento, foram utilizados os dados meteorológicos diários disponíveis na Estação Agroclimatológica do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), localizada a cerca de 300 metros do local do experimento, e a 23° 22' de latitude sul, 51° 10' de longitude oeste de Greenwich e a 585 metros de altitude.

Utilizaram-se as observações diárias de precipitação (mm dia^{-1}), temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar ($\text{cal. cm}^{-2}\text{dia}^{-1}$), horas de brilho solar (h. dia^{-1}) e velocidade do vento (milhas. dia^{-1}) medida a 2 m de altura.

Para o cálculo do balanço hídrico seriado diário, estimou-se a evapotranspiração potencial pela equação proposta por Penman (1956). O balanço hídrico seriado diário foi efetuado para o período compreendido entre 1^o de janeiro de 1976 e 31 de dezembro de 1984.

Elaborou-se um programa de computador que procedeu à transformação das datas do calendário romano em calendário absoluto, seqüencialmente, considerando, em cada ano, o dia 21 de setembro como o primeiro dia. Assim, transformaram-se as datas de plantio, de emergência e as datas de todos os estágios fenológicos reprodutivos, em números reais.

Este arquivo de dados fenológicos, associado ao arquivo das relações ETR/ETP diárias, foi utilizado por outro programa, para fornecer a somatória das mesmas para cada subperíodo desejado. Finalmente, com estes totais, calculados para os subperíodos, derivaram-se os modelos que relacionam a ETR/ETP com o rendimento relativo da soja

utilizando-se o Statistical Analysis System (SAS). O rendimento relativo (y/y_{\max}) é aqui definido como a relação entre o rendimento real (y), apresentado por determinado tratamento, e o rendimento máximo (y_{\max}). Seguindo o critério adotado por Berlatto (1987), considerou-se que o rendimento máximo, expresso em kg/ha, corresponde ao maior rendimento observado em toda a série de dados experimentais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos que descrevem a relação entre o rendimento relativo da soja e a variável ETR/ETP, acumulada diariamente em quatro subperíodos, estão apresentados na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta o resumo dos resultados da análise de regressão e dos testes estatísticos de significância.

Adotou-se o critério de optar, em cada cultivar, pelo modelo que, ao mesmo tempo, apresente

TABELA 1. Modelos de regressão múltipla entre a somatória de ETR/ETP, por subperíodo do ciclo de três cultivares de soja e respectivos rendimentos relativos. Londrina, PR (1976/77 a 1983/84)¹.

Cultivar/período	Coefficiente de determinação
Paraná	
1: $y/y_{\max} = 0,073 \times E_2^{0,453}$	0,521
2: $y/y_{\max} = 0,033 \times E_1^{0,153} \times E_2^{0,439}$	0,542
3: $y/y_{\max} = 0,024 \times E_1^{0,153} \times E_2^{0,384} \times E_3^{0,117}$	0,556
4: $y/y_{\max} = 0,021 \times E_1^{0,140} \times E_2^{0,388} \times E_3^{0,095} \times E_4^{0,054}$	0,558
Bossier	
2: $y/y_{\max} = 0,036 \times E_2^{0,380} \times E_3^{0,195}$	0,579
3: $y/y_{\max} = 0,038 \times E_2^{0,397} \times E_3^{0,195} \times E_4^{-0,031}$	0,582
4: $y/y_{\max} = 0,023 \times E_1^{0,123} \times E_2^{0,393} \times E_3^{0,177} \times E_4^{-0,046}$	0,593
Santa Rosa	
2: $y/y_{\max} = 0,035 \times E_2^{0,202} \times E_3^{0,354}$	0,580
3: $y/y_{\max} = 0,057 \times E_2^{0,238} \times E_3^{0,338} \times E_4^{-0,112}$	0,613
4: $y/y_{\max} = 0,026 \times E_1^{0,208} \times E_2^{0,236} \times E_3^{0,292} \times E_4^{-0,156}$	0,658

¹ $E_1 = VE - R_1$; $E_2 = R_1 - R_4$; $E_3 = R_4 - R_6$; $E_4 = R_6 - R_8$; E = Somatória diária da relação ETR/ETP em cada subperíodo; VE = Emergência (cotilédones acima da superfície do solo); 1 4 = número de variáveis utilizadas no modelo; y max. (Paraná) = 3.150 kg/ha; y max (Bossier) = 2.946 kg/ha; y max (Santa Rosa) = 3.057 kg/ha.

significância, ao nível de 5% de probabilidade, do parâmetro B_0 (B zero), quanto a cada uma das variáveis selecionadas e quanto ao próprio modelo. Nos casos em que este critério selecionou mais de um modelo, escolheu-se o que apresentava o mais alto nível de significância e, conseqüentemente, o mais alto valor de F.

Na Tabela 2, observa-se que, no caso da cultivar Paraná, os modelos explicam de 52,1% a 55,8% da variação devida ao ambiente e apresentam alta significância para B_0 e para o sub-período R1 - R4, bem como para o modelo que utiliza estas duas variáveis. Apesar de que os modelos que incluem duas, três ou quatro variáveis apresentem significância, observa-se que apenas são significativas as regressões para B_0 e R1 - R4.

Na Tabela 2, também observa-se que os modelos correspondentes à cultivar Bossier apresentaram significância quando foram utilizadas duas, três ou quatro variáveis. Os valores de B_0 e das variáveis R1 - R4 sempre foram significativos, nos quatro modelos. Por outro lado, as variáveis VE - R1 e R6 - R8 não apresentam significância ao nível de 5% de probabilidade, em nenhum modelo. Desse modo, escolheu-se o modelo que selecionou as variáveis R1 - R4 e R4 - R6, o qual apresenta significância, a este nível, no que diz respeito ao modelo, ao B_0 e às duas variáveis consideradas. Os coeficientes de determinação oscilaram entre 0,593 e 0,579, sendo que este último corresponde ao modelo escolhido.

Os resultados referentes à cultivar Santa Rosa, apresentados na Tabela 2, de modo idêntico aos das outras cultivares, não apresentam significância quanto à variável VE - R1, em nenhum modelo. O parâmetro B_0 e as variáveis R1 - R4 e R4 - R6 apresentam significância ao nível de 5% de probabilidade, em todos os modelos. A variável R6 - R8 somente apresenta significância no tocante ao modelo, que inclui as quatro variáveis. Desse modo, aplicando rigorosamente os critérios de escolha do modelo aqui estabelecidos, optou-se pelo modelo de duas variáveis, para a cultivar Santa Rosa. Os coeficientes de determinação oscilaram entre 0,658 e 0,580, sendo este último o que corresponde ao modelo escolhido.

Os modelos aqui apresentados, e que relacionam a somatória diária da relação ETR/ETP com o ren-

TABELA 2. Valores de probabilidade dos testes t e F e coeficientes de determinação para os modelos de relação entre a somatória diária de ETR/ETP e rendimento relativo, de três cultivares de soja em diversos subperíodos dos respectivos ciclos, para 32 ambientes, no período 1976/84. Londrina, PR¹.

B ₀	Subperíodos				Modelos		
	VE-R1	R1-R4	R4-R6	R6-R8	r ²	Prob>F	F
Paraná							
0,0028	0,670	0,001	0,514	0,724	0,558	0,00028	8,520
0,00132	0,264	0,0009	0,639	-	0,556	0,00012	11,681
0,00027	0,261	0,00004	-	-	0,542	0,00006	17,160
0,00001	-	0,00003	-	-	0,521	0,00003	32,677
Bossier							
0,00001	0,599	0,00067	0,08054	0,570	0,593	0,00013	9,830
0,00001	-	0,00057	0,05009	0,692	0,582	0,00007	12,978
0,00001	-	0,00031	0,04681	-	0,579	0,00003	19,963
Santa Rosa							
0,00014	0,067	0,00182	0,00504	0,047	0,658	0,00003	12,958
0,00001	-	0,00228	0,00187	0,133	0,613	0,00004	14,753
0,00001	-	0,00551	0,00145	-	0,580	0,00003	20,019

¹ B₀ = interseção da função com o eixo dos y; r² = coeficiente de determinação.

dimento da soja, serão discutidos com o objetivo de explicitar a influência da disponibilidade hídrica sobre a resposta da soja à época de plantio. Assim, propositadamente, não foram incluídas nos modelos, as variáveis que quantificam a influência da disponibilidade fotoperiódica e térmica sobre a resposta da soja à época de plantio. Esta opção foi adotada porque não é objetivo deste trabalho derivar um modelo matemático de previsão do rendimento da soja com base em variáveis meteorológicas. Entretanto, os modelos aqui discutidos poderão evoluir para modelos de previsão da produtividade com a ulterior inclusão de variáveis que quantifiquem a influência de fotoperíodo e temperatura sobre o rendimento da soja. Com efeito, apesar de os modelos aqui derivados computarem a influência do fotoperíodo e da temperatura sobre o rendimento, através da determinação observacional de cada estágio fenológico, eles não incluem o efeito desta variável sobre o crescimento, a atividade fotossintética e outros aspectos da fisiologia da

planta, como a síntese de açúcares e demais processos fisiológicos que têm efeito sobre o crescimento vegetativo e sobre o rendimento.

No cálculo do balanço hídrico, optou-se por admitir um armazenamento de água no perfil de 0-60 cm, como constante ao longo de todo o ciclo. Este procedimento simplificador está de acordo com a opção adotada na maioria dos trabalhos realizados nesta área. Esta foi a opção adotada por Brunini et al. (1982) e Camargo (1984). Berlatto (1987), em trabalho realizado no Rio Grande do Sul, utilizou a capacidade de armazenamento de água no perfil de 0-20 cm e 0-60 cm, para os primeiros dias após a emergência e para o restante do ciclo, respectivamente. Este procedimento, ainda que considerado arbitrário pelo próprio autor, foi adotado por Berlatto (1987) em virtude da inexistência de informações sobre o desenvolvimento do sistema radicular da soja para os solos da área em estudo. Assim, tem-se consciência de que este é um procedimento simplificador em relação à realidade da

fisiologia da cultura, no que se refere ao desenvolvimento e atividade do sistema radicular. Entretanto, atualmente, ainda é inevitável.

Rose & Stern (1967) mostraram que a zona em que ocorre a absorção de água pela planta, não é constante ao longo do ciclo. Rose & Stern (1967) também mostraram, analiticamente, que o padrão de extração de água do solo por um sistema radicular pode ser determinado executando-se cálculos repetidos para pequenos e sucessivos intervalos de tempo e profundidade. Isto sugere a integração de uma função que descreva a absorção de água pela planta ao longo do tempo e do perfil. Em outros termos, Rose & Stern (1967) mostraram que, ao longo do ciclo, a absorção ocorre a profundidades cada vez maiores e estabiliza-se a partir de determinado ponto.

Por outro lado, Hillel (1982) afirma que a taxa segundo a qual as plantas absorvem água de determinado volume de solo, depende da densidade do sistema radicular, além da condutividade hidráulica do solo e da diferença entre a tensão de água do solo e a sucção pelas raízes. Estas afirmações de Hillel (1982) estão de acordo com Ogata et al. (1960), que encontraram desuniformidade na absorção de água em distintas profundidades do solo. Espinosa (1982), trabalhando com algumas cultivares de soja, em Latossolo Vermelho-Escuro do cerrado, observou que a maior parte da água (80%) foi extraída na camada de 0-80 cm do solo.

Admitiu-se, portanto, que a utilização desta simplificação resulta em subestimativas da influência da disponibilidade de água no solo sobre o rendimento de soja. Conseqüentemente, também se admitiu que o consumo relativo de água poderá explicar mais do que os 52,10%, 57,90% e os 58,00%, determinados nos modelos aqui derivados.

Esta linha de raciocínio enfatiza o que é matematicamente explicitado pelos modelos aqui derivados, e conduz à conclusão de que o rendimento da soja, estimado através das cultivares estudadas neste trabalho depende principalmente da disponibilidade hídrica no subperíodo R1 - R6. Este é um resultado que concorda com os resultados que foram obtidos por Berlato & Bergamaschi (1979), Garcia (1979), Berlato (1981), Torres (1981), Espinosa (1982), Mota (1983), Camargo (1984) e

Berlato (1987) no Brasil e Shaw & Laing (1965), Scott & Aldrich (1970) e Lawn & Byth (1973) no exterior, e os confirma.

Berlato (1987) é bastante seguro e categórico ao concluir que "o período reprodutivo da soja (50 dias após o florescimento) é o mais crítico em relação ao déficit hídrico".

Além disso, os estágios críticos relativos a cada cultivar estudada foram semelhantes aos obtidos por Berlato (1987). O modelo correspondente à cultivar precoce Paraná selecionou o estágio R1 - R4 como o mais crítico para a obtenção do rendimento máximo da cultivar, em face do consumo relativo de água, nas condições do experimento. Para as cultivares Bossier e Santa Rosa, foram selecionados os subperíodos R1 - R4 e R4 - R6.

Os coeficientes de determinação dos modelos derivados neste trabalho foram inferiores aos obtidos por Mota (1983), Camargo (1984) e Berlato (1987), os quais obtiveram coeficientes que variaram de 0,71 até 0,87. Isto se explica pelo fato de que tais autores trabalharam numa faixa de variação de plantio bem menor que a utilizada neste trabalho. Com este procedimento, os autores acima citados isolaram, parcialmente, as influências das disponibilidades fotoperiódicas e térmicas sobre o rendimento da soja. Conseqüentemente, seus trabalhos produziram resultados nos quais o rendimento de soja tornou-se mais dependente das disponibilidades hídricas, as quais se tornaram fator quase exclusivo de controle da variabilidade do rendimento da soja, especialmente quando cultivada nas épocas de maior disponibilidade térmica e fotoperiódica. Em outros termos, como as limitações de caráter térmico e fotoperiódico foram reduzidas a um mínimo, o rendimento foi controlado principalmente pelas disponibilidades hídricas, resultando em valores do coeficiente de determinação mais altos do que os obtidos neste trabalho. Com efeito, nas épocas extremas, a variabilidade do rendimento é limitada pela insuficiência fotoperiódica, como foi o caso de plantios realizados em janeiro, neste trabalho.

Também a redução de rendimento, resultante do atraso no plantio para fins de dezembro ou janeiro, é determinada pela redução da disponibilidade hídrica ocorrente no final de fevereiro e março,

além do efeito depressivo dos regimes fotoperiódico e térmico a que são expostos os plantios tardios. Estas afirmações também encontram respaldo nos resultados e conclusões de Torres (1981), na região norte do Paraná.

Portanto, a produção de soja em plantios tardios, na região norte do Paraná, não depende apenas da solução das limitações impostas pelo regime fotoperiódico e térmico. É necessário que sejam realizados estudos sobre a viabilidade econômica da suplementação de água, em integração com os esforços em execução pela área de genética e melhoramento de plantas.

CONCLUSÃO

O efeito da oferta hídrica sobre a resposta das cultivares de soja Paraná, Bossier e Santa Rosa, à época de plantio, expressa em termos de rendimento relativo (y/y_{max}), pode ser representado pelas seguintes equações, nas condições experimentais aqui utilizadas:

Cultivar Paraná:

$$y/y_{max} = 0,073 \times (ETR/ETP)_i^{0,453}$$

Cultivar Bossier:

$$y/y_{max} = 0,036 \times (ETR/ETP)_i^{0,380} \times (ETR/ETP)_j^{0,195}$$

Cultivar Santa Rosa:

$$y/y_{max} = 0,035 \times (ETR/ETP)_i^{0,202} \times (ETR/ETP)_j^{0,354}$$

sendo: y/y_{max} o rendimento relativo; ETR a evapotranspiração real diária acumulada no subperíodo i ou j ; ETP a evapotranspiração potencial diária acumulada no subperíodo i ou j ; i o subperíodo R1 - R4; j o subperíodo R4 - R6.

REFERÊNCIAS

- BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; WESTPHALEN, S.L. Época de semeadura de soja no Rio Grande do Sul: avaliação e interpretação dos ensaios ecológicos de soja. *IPAGRO Informa*, v.18, p.7-14, 1977.
- BERLATO, M.A. Bioclimatologia da soja. In: MYASAKA, S.; MEDINA, J.C. (Eds.). *A Soja no Brasil*. Campinas: [s.n.], 1981. p.175-184.
- 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, SP: INPE, 1987. 94p. Tese de Doutorado.
- BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Consumo de água da soja. I. Evapotranspiração estacional em condições de ótima disponibilidade de água no solo. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1., 1978, Londrina. *Anais...* Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1979, v.1, p.53-58.
- BERLATO, M.A.; GONÇALVES, H.M. Relação entre o índice hídrico P/ETP e rendimento da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Agronomia Sulriograndense*, Porto Alegre, v.1, n.2, p.227-233, 1978.
- BRUNINI, O.; MIRANDA, M.A.C.; MASCARENHAS, M.A.A.; PEREIRA, J.C.V.N.; SCHMIDT, N.C. Teste de um modelo agroclimático que relaciona o regime pluviométrico com a variação da produtividade agrícola. In: SEGOVIA, R.M. **Determinação do efeito da precipitação pluviométrica na produção agrícola**. Brasília: CFP, 1982. p.24-46. (Coleção análise e pesquisa, 24).
- BUNTLEY, G.J.; McCUTCHEN, T.; MORGAN, H.Jr. Soybean yields as affected by rainfall distribution during flowering and pod filling. *Tennessee Farm and Home Science*, Karamville, p.8-10, Oct. 1973.
- BUSS, A.; QUEIROZ, E.F.; TERASAWA, F.; KASTER, M.; MENOSSO, O. G. *Soja 72*. Curitiba: IPEAME, 1972. 24p. (IPEAME. Circular, 14).
- CAMARGO, M.B.P. **Exigências bioclimáticas e estimativa da produtividade para quatro cultivares de soja no Estado de São Paulo**. Piracicaba, SP: USP, 1984. 96p. Tese de Mestrado.
- DOSS, G.S.; PEARSON, R.W.; ROGERS, H.T. Effect of soil water stress at various growth stages on soybeans yield. *Agronomy Journal*, Madison, v.66, n.2, p.297-299, 1974.
- ESPINOSA, W. Resposta de doze cultivares de soja ao déficit hídrico em Latossolo Vermelho-Escuro de cerrados do Distrito Federal. I. Rendimentos, área foliar e desenvolvimento radicular. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.17, n.3, p.447-458, 1982.
- FEHR, W.R.; CAVINESS, H.E.; HARWOOD, D.T.; PENNINGTON, J.S. Stage of development

- descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, Madison, n.6, p.929-931, Nov./Dec. 1971.
- GARCIA, A. Estudo do índice de colheita e de outras características de dez cultivares de soja, *Glycine max* (L.) Merrill, e de suas correlações com a produção de grãos em duas épocas de semeadura. Viçosa, MG: UFV, 1979. Tese de Mestrado.
- GODOY, M.; CORREA, A.R.; BERNARDES, L.R.M. **Cartas climáticas básicas do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 1978. 38p.
- GRISSON, P.; RAWAY, W.A.; HOGG, P. **Crop response to irrigation in the Yazoo - Mississippi Delta**. Mississippi: Mississippi Agricultural Experimental Station 1955. 21p. (Bulletin, 531).
- HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. São Paulo: Academic Press, 1982. 364p.
- HOWELL, R.W. Physiology of the soybean. In: NORMAN, A.G. (Ed.). **The soybean**. New York: Academic Press, 1967. p.75-124.
- LAWN, J.R.; BYTH, D.E. Response of soybeans to planting date in southeastern Queensland. I. Influence of photoperiod and temperature on phasic development patterns. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourn, v.24, n.1, p.67-80, Jan. 1973.
- MOTA, F.S. Weather - technology models for corn and soybeans in the south of Brazil. **Agricultural Meteorology**, v.28, n.1, p.49-64, 1983.
- MOTA, F.S.; GARCEZ, J.R.B.; BONATO, E.R.; DALL'AGNOL, A. **Época de semeadura da soja no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. [S.l.]: IPEAS, 1973. 5p. Mimeografado.
- OGATA, G.; RICHARDS, L.A.; GARDNER, W.R. Transpiration of alfalfa determined from soil water changes. **Soil Science**, v.89, p.179-182, 1960.
- PASCALE, A.J. Tipos agroclimáticos para el cultivo de la soya en la Argentina. **Revista de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de Buenos Aires**, Buenos Aires, v.17, n.3, p.31-38, 1969.
- PENMAN, M.I. Evaporation: an introductory survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.4, p.9-29, 1956.
- QUEIROZ, E.F. **Efeito de época de plantio e população sobre o rendimento e outras características agronômicas de quatro cultivares de soja, (*Glycine max* (L.) Merrill)**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 1975. 108p. Tese de Mestrado.
- QUEIROZ, E.F.; KASTER, M.; TERASAWA, F. **Soja no Paraná**. Curitiba, PR: IPEAME, 1971, 24p. (IPEAME. Circular, 9).
- QUEIROZ, E.F.; NEUMAIER, N.; TORRES, E. Ecologia e manejo da cultura. In: EMBRAPA. **Ecologia, manejo e adubação da soja**. Londrina, PR: EMBRAPA-CNPSO, 1979. 91p. (EMBRAPA-CNPSO. Circular, 2).
- ROGERS, H.V. Selection and importance of water. In: SOYBEAN production: recent research findings. [S.l.]: Auburn Agricultural Experimental Station, 1971. p. 11-16 (Bulletin, 413).
- ROSE, C.W.; STERN, W.R. The drainage component of the water balance equation. **Australian Journal of Soil Science**, v.3, p.95-100, 1967.
- RUNGE, E.A.; ODELL, R.T. The relation between precipitation, temperature and the yield of soybeans at the agronomy south farm. **Agronomy Journal**, Madison, v.52, n.5, p.245-247, May 1960.
- SCOTT, W.O.; ALDRICH, S.R. **Modern soybean production**. Cincinnati: The Farm Quarterly, 1970. 192p.
- SHAW, R.H.; LAING, D.R. Moisture stress and plant response. In: PIERRE, W. H. (Ed.) **Plant environment and efficient water use**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. Cap. 5, p.87-92.
- SIONIT, N.; KRAMER, P.J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.69, n.2, p.274-278, 1977.
- TORRES, E. **Efeito de época de semeadura, espaçamento entre fileiras e população de plantas sobre o rendimento de grãos e outras características agronômicas da soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**, em Londrina, PR. Viçosa, MG: UFV, 1981, 107p. Tese de Mestrado.