

ELIZABETE ALVES FERREIRA

**AVALIAÇÃO E TESTE DO MODELO EXPOLINEAR APLICADO À
CULTURA DA SOJA [*Glycine max* (L.) Merrill] CULTIVADA EM
DIFERENTES CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA E DE
INTENSIDADE DE RADIAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Meteorologia Agrícola, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
DEZEMBRO – 2000

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

F383a
2000

Ferreira, Elizabete Alves, 1971-

Avaliação e teste do modelo expolinear aplicado à cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] cultivada em diferentes condições de disponibilidade hídrica e de intensidade de radiação / Elizabete Alves Ferreira. -- Viçosa : UFV, 2000.
51p. : il.

Orientador: Luiz Cláudio Costa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Soja - Crescimento - Modelos matemáticos.
 2. Soja - Crescimento - Efeito da radiação solar interceptada.
 3. Soja - Déficit hídrico.
 4. Soja - Graus dias.
- I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 633.34

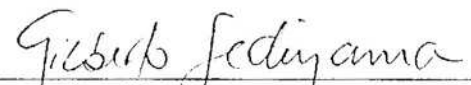
CDD 20.ed. 633.34

ELIZABETE ALVES FERREIRA

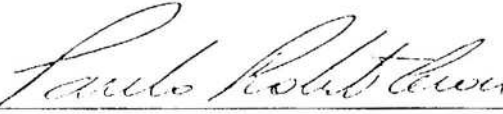
**AVALIAÇÃO E TESTE DO MODELO EXPOLINEAR APLICADO À
CULTURA DA SOJA [*Glycine max* (L.) Merrill] CULTIVADA EM
DIFERENTES CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA E DE
INTENSIDADE DE RADIAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte do
Programa de Pós-Graduação em
Meteorologia Agrícola, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 14 de fevereiro de 2000.



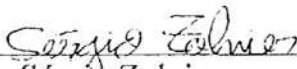
Prof. Gilberto C. Sedyama
(Conselheiro)



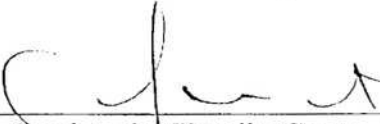
Prof. Paulo Roberto Cecon
(Conselheiro)



Brauliro Gonçalves Leal



Sérgio Zolnier



Prof. Luiz Cláudio Costa
(Orientador)

A Deus.

Aos meus pais Anóbio Ferreira e Juracy Alves Ferreira.

À minha tia Maria Terezinha Ferreira Melo.

A todos os meus irmãos.

Ao meu noivo Tadeu Robson Melo Cavalcante.

AGRADECIMENTO

A todos os meus familiares, em especial à minha tia Maria Terezinha F. Melo, pelo carinho e apoio.

Ao Tadeu Robson Melo Cavalcante, pelo apoio e pela atenção em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela minha formação acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Ao professor Luiz Cláudio Costa, pela orientação e amizade.

Aos professores Gilberto C. Sedyama, Everardo Chartuni Mantovani e Paulo Roberto Cecon, pelo aconselhamento e pela amizade.

Ao professor José Gomes Chaves, pela amizade e pelo apoio.

Aos professores José Lívio Gomide e Laércio Zambolin, pela colaboração sempre que solicitados.

Ao professores Dirceu Coelho, Aristides Ribeiro, Paulo Hamakawa, Marcos Heil e José Maria Nogueira da Costa, pela amizade.

A todos os meus amigos de república Alessandro (Palmeira), Fabiano (Papelim) e Leila, pela amizade e pelo incentivo.

Aos funcionários dos Laboratórios de Física do Solo e Fertilidade de Solos da UFV, pela colaboração.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia Gino e Gilberto, pelo apoio durante a realização do experimento.

Ao Antônio Eustakyo Marcos, funcionário da Garagem Central, pela colaboração no transporte até o local do experimento.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola Carlão, José e Silas, pelo auxílio durante a coleta de dados.

A Edna, Fernanda, Marcus, Maria Célia, José Galinári, José Coelho, Joel, Fátima, Evaristo, Daniel e demais funcionários do DEA, pela amizade.

A Williams e Cécilia, pelo apoio e pela amizade.

A Carlos Pereira e Francisca Zenaide, pelo apoio e empenho durante a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos do Curso de Meteorologia Agrícola, em especial a Ana, Leila, Marcos, Alexsandra, Alexandre, Jairo, Graça, Silvia, Olivio e Bergson, e a todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ELIZABETE ALVES FERREIRA, filha de Anóbio Ferreira e Juracy Alves Ferreira, nasceu no dia 17 de setembro de 1971, na cidade de Brevés, no Estado do Pará.

Em março de 1992, ingressou no Curso de Meteorologia da Universidade Federal do Pará, Belém, PA, concluindo-o em julho de 1997.

Em agosto de 1997, iniciou o Curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola.

Em fevereiro de 2000, submeteu-se aos exames finais de defesa de tese.

CONTEÚDO

LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
EXTRATO.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
2.1. Descrição da área de coleta dos dados.....	9
2.2. Dados meteorológicos.....	9
2.2.1. Medidas de radiação solar.....	10
2.3. Delineamento experimental e tratamentos.....	10
2.4. Plantio.....	11
2.5. Sistema de irrigação.....	12
2.6. Amostragem da cultura.....	11
2.7. Graus-dia.....	13
2.8. Modelo expolinear.....	13
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	14
3.1. Condições climáticas durante os três anos agrícolas.....	14

3.2. Crescimento da cultura da soja nos diferentes anos agrícolas, utilizando-se a função expolinear e considerando o tempo, ou seja, dias após o plantio, como variável independente.....	18
3.3. Crescimento da cultura da soja nos diferentes anos agrícolas, utilizando-se a função expolinear e considerando graus-dia como variável independente.....	25
3.4. Crescimento da cultura da soja nos diferentes anos agrícolas, utilizando-se a função expolinear e considerando a evapotranspiração acumulada da cultura como variável independente.....	32
3.5. Crescimento da cultura da soja nos diferentes anos agrícolas, utilizando-se a função expolinear e considerando a radiação interceptada como variável independente.....	39
4. RESUMO E CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

LISTA DE QUADROS

1	Tratamentos utilizados em diferentes anos agrícolas.....	11
2	Médias mensais de radiação, precipitação total e temperatura (média) do ciclo da cultura da soja, nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98 e 1998/99.....	18
3	Taxa de crescimento máximo (C_m), taxa de crescimento relativo (R_m), tempo perdido (t_b) e desvio-padrão e R^2 nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98, 1998/99.....	23
4	Taxa de crescimento máximo (C_m), taxa de crescimento relativo (R_m), Graus-dias (GD) e desvio-padrão e R^2 nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98, 1998/99 em função de graus-dia.....	30
5	Taxa de crescimento máximo (C_m), taxa de crescimento relativo (R_m), Evapotranspiração da cultura (t_b), desvio-padrão e R^2 nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98, 1998/99.....	38
6	Taxa de crescimento máximo (C_m), taxa de crescimento relativo (R_m), radiação interceptada (t_b) e desvio-padrão e R^2 nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98, 1998/99.....	43

LISTA DE FIGURAS

1	Temperatura média diária durante o período experimental.....	15
2	Temperatura máxima ocorrida durante o período experimental.....	15
3	Temperatura mínima ocorrida durante o período experimental.....	16
4	Precipitação pluvial ocorrida durante os períodos experimentais.....	17
5	Radiação solar global ocorrida durante os períodos de estudo.....	17
6	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1995/96: a) IPTP, b) NIFF, c) NIFV e d) NITP.....	19
7	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1997/98: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFV e d) NIFF.....	20
8	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1998/99: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFV e d) NIFF.....	21
9	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1995/96: a) IPTP, b) NIFV, c) NIFF e d) NITP.....	26
10	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1997/98: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFV e d) NIFF.....	27
11	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1998/99: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFV e d) NIFF.....	28
12	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos no ano agrícola 1995/96: a) IPTP, b) NIFF, c) NIFV e d) NITP.....	33

13	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1997/98: a) ITP, b) ISFV, c) NIFF e d) NIFV.....	34
14	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1998/99: a) ITP, b) ISFV, c) NIFF e d) NIFV.....	35
15	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1995/96: a) ITP, b) NIFF, c) NIFV e d) NITP.....	40
16	Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1998/99: a) ITP, b) ISFV, c) NIFF e d) NIFV.....	41

EXTRATO

FERREIRA, Elizabete Alves Ferreira, MS., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2000. **Avaliação e teste do modelo expolinear aplicado à cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] cultivada em diferentes condições de disponibilidade hídrica e de intensidade de radiação.** Orientador: Luiz Cláudio Costa. Conselheiros: Gilberto C. Sedyama, Everardo Chartuni Mantovani e Paulo Roberto Cecon.

Objetivando avaliar e testar o modelo expolinear aplicado à cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) crescendo em diferentes condições de disponibilidade hídrica e de intensidade de radiação, três experimentos de campo foram conduzidos nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98 e 1998/99 na Área Experimental Vila Chaves, da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG. Tais experimentos permitiram a análise do ajuste e do comportamento dos parâmetros da função expolinear aos dados de crescimento da cultura da soja em diferentes condições de disponibilidade de água e intensidade de radiação. Os resultados indicaram o alto potencial de se utilizar a função expolinear alterando a variável independente da sua forma original de dias, para graus-dia, água evapotranspirada e radiação interceptada. O modelo apresentou bons ajustes em todos os casos, evidenciando-se o alto potencial da função e de seus parâmetros em serem utilizados na comparação de culturas crescendo em diferentes condições ambientais e épocas de plantio. Os parâmetros C_m , R_m e t_b mostraram-se

sensíveis às variações dos elementos climatológicos. No entanto, o parâmetro que mais se destacou, por sua alta confiabilidade, foi o C_m .

ABSTRACT

FERREIRA, Elizabete Alves Ferreira, M. S., Universidade Federal de Viçosa, december, 2000. **Evaluation and test of the expolinear model applied to soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] cultivated at different levels of water availability and radiation intensity.** Adviser: Luiz Cláudio Costa. Committee Members: Gilberto C. Sedyama, Everardo Chartuni Mantovani e Paulo Roberto Cecon.

With the objective of evaluating and testing the expolinear model applied to soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] cultivated at different levels of water availability and radiation intensity, three experiments were conducted in the agricultural years 1995/96, 1997/98 and 1998/99, in the experimental area Vila Chaves, belonging to the Universidade Federal de Viçosa. Such experiments allowed the analysis of fitting and behavior of the expolinear function parameters to data of soybean growth at different levels of water availability and radiation intensity. Results showed the great potential of the expolinear function for changing the independent variable from its original form in days to day-degrees, evapotranspirated water and intercepted radiation. The model gave good fittings in all cases, showing the great potential of this function and its parameters for comparison of crops growing in different environments and planting times. C_m , R_m , and t_b parameters were shown to be

sensitive to climatic elements. However, C_m was the parameter that stood out considerably, for its great reliability.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, várias técnicas vêm sendo desenvolvidas para a quantificação da taxa de crescimento das culturas. Uma grande contribuição científica, para o entendimento quantitativo das relações entre o crescimento da planta e os elementos climáticos, foi dada por GREGORY (1918) e BLACKMAN (1919), que introduziram o conceito de taxa de crescimento relativo (TCR), definido como "o aumento da matéria seca da planta por unidade de matéria seca presente por unidade de tempo e taxa de assimilação líquida (TAL), que é o aumento de matéria seca da planta por unidade de matéria seca de folhas por unidade de tempo". Tais técnicas foram incorporadas, o que ficou conhecido como "análise de crescimento", na qual se utilizou de descrições matemáticas para determinação dos parâmetros de crescimento (KOLLER et al., 1970). A partir daí, vários outros estudos foram desenvolvidos sobre a relação entre planta e ambiente.

Uma análise mais detalhada dessas contribuições permitiu dividi-las, em termos didáticos, em três grupos principais: modelos empíricos, modelos semi-empíricos e modelos mecanísticos.

Os modelos empíricos baseiam-se simplesmente na interação quantitativa entre a taxa de crescimento da cultura e um ou mais fatores que influenciam essa taxa, ou seja, apresentam a taxa de crescimento ou a quantidade

de matéria seca como variável dependente e fatores como nitrogênio, temperatura, água evapotranspirada e tempo, dentre outros, como variáveis independentes (REYNOLDYS e ACOCK, 1985).

Os modelos empíricos têm como objetivo a descrição da relação quantitativa entre a taxa de crescimento das culturas e os fatores ambientais considerados, não se preocupando com os entendimentos físico e fisiológico dessas relações. Apesar de suas limitações, tais modelos vêm sendo utilizados, com sucesso, na determinação da taxa de crescimento das culturas em resposta a diferentes elementos climáticos (LITTLETON, 1979; HUNT, 1979; TEI et al., 1996).

Os modelos empíricos apresentam a vantagem de serem simples, no que tange aos dados de entrada, e robustos, quanto à sua resposta. Suas maiores restrições são o fato de não poderem ser extrapolados no tempo e no espaço, bem como a falta de significados físico e fisiológico de seus parâmetros.

Na busca de maior entendimento na relação entre elementos climáticos e o crescimento da cultura, MONSI e SAEKI (1953) estudaram a interceptação da radiação solar pelas culturas, descrevendo como a radiação penetra no dossel. MONTEITH (1965), considerando esse estudo, iniciou a observação da relação entre a radiação interceptada e a matéria seca produzida pela cultura; anos depois, introduziu o conceito de uso eficiente da radiação (UER), que é a razão entre a matéria seca produzida e a radiação interceptada pelas culturas (MONTEITH, 1977). A introdução de tal conceito pode ser considerada como o início dos modelos semi-empíricos, que, além da relação quantitativa, relacionam-se com a identificação dos elementos ambientais responsáveis pelo crescimento da cultura, assim como o entendimento, ainda que superficial, das relações entre a cultura e o ambiente.

O conceito de uso eficiente da radiação vem sendo testado com sucesso ao longo dos anos, em diferentes culturas crescendo em diversas condições ambientais.

DE WIT et al. (1970) introduziram o conceito de modelos mecanísticos. Tais modelos se baseiam no entendimento do sistema a ser

modelado, ou seja, buscam o entendimento dos processos físicos e fisiológicos que influenciam a taxa de crescimento das culturas.

STEER et al. (1993) desenvolveram um modelo mecanístico para descrever adequadamente o crescimento e a produção da cultura de girassol em resposta a temperatura, radiação, tempo e aplicação de nitrogênio. Os resultados encontrados no modelo foram consistentes para a produção dessa cultura.

Os modelos CERES, que estimam a previsão e o rendimento de grãos, são exemplos de modelos mecanísticos e requerem como dados de entrada aqueles relacionados às condições atmosféricas, ao solo, às constantes genéticas e às práticas de manejo. O modelo tem sido testado em diversos países, inclusive no Brasil, apresentando bons resultados de produção (LIU, 1989; LIMA, 1995).

O modelo Soyclima é um modelo mecanístico, com resultados satisfatórios na determinação das variações morfológicas e fisiológicas da cultura, em resposta às variações climáticas (FERREIRA, 1997). Outro exemplo é o modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.) desenvolvido por BARROS (1998), que considerou os processos fisiológicos inerentes ao crescimento e ao desenvolvimento, como fotossíntese máxima, partição de fotoassimilados condicionados pelo estágio de desenvolvimento da cultura, eficiência de conversão de carboidratos em matéria seca para folhas, colmo, raízes e grãos e respiração de crescimento e de manutenção, mostrando-se consistentes para o modelo de simulação.

Esses modelos têm contribuído para a melhor compreensão da relação entre o crescimento de plantas e o ambiente, porém apresentam como restrição, em alguns casos, a necessidade de grande número de dados de entrada.

Recentemente, tem-se observado, para aplicação prática, tendência à simplificação dos modelos mecanísticos ou, talvez, um retorno mais crítico aos modelos semi-empíricos. No entanto, para que tal simplificação possa ser feita em bases científicas, é necessário que se tenha amplo entendimento sobre o sistema considerado, ou seja, deve-se buscar amplo entendimento dos efeitos dos elementos climáticos na taxa de crescimento das culturas.

Dentre os elementos climáticos que afetam a taxa de desenvolvimento da cultura, destacam-se a radiação, a temperatura e a precipitação.

Os estudos que objetivam a interação quantitativa entre tais fatores e a produtividade das culturas trabalham com índices que indicam a eficiência da cultura em crescer ou desenvolver em resposta à disponibilidade desses fatores. Tais índices são conhecidos como uso eficiente da radiação solar, uso eficiente da água e graus-dia.

Os estudos dos efeitos da radiação na taxa de crescimento das culturas, utilizando-se uso eficiente da radiação (UER), vem sendo de extrema importância para o entendimento quantitativo da relação cultura–radiação, enquanto vários estudos têm evidenciado que o UER apresenta valores constantes para diversas culturas. HUGHES et al. (1987) relataram ter observado grande variabilidade no UER em diferentes culturas crescendo em condições adequadas de umidade e nutrientes no solo (KINIRY et al., 1989).

A variabilidade nos valores do UER é explicada, em termos de parâmetros físicos, como o déficit de pressão de vapor (STOCKLE e KINIRY, 1990), temperatura (HUNT, 1982; HAMMER e VANDERLIP, 1989), estresse de água (ONG e MONTEITH, 1985), troca de CO₂ e conteúdo de nitrogênio na folha (SINCLAIR e HORIE, 1989).

COSTA et al. (1999), estudando o UER na cultura da soja, em condições de estresse hídrico e nas diferentes fases fenológicas, observaram que, na fase vegetativa, ocorreu redução de 40% na radiação interceptada pela cultura, enquanto o UER aumentou em 40%. Assim, esses autores concluíram que, na fase vegetativa, a cultura da soja possui habilidade para compensar o menor poder de captura por meio de aumento na eficiência de utilização da radiação.

O aumento da demanda de água na agricultura traz grandes desafios para os pesquisadores, no que concerne ao aumento da eficiência de utilização da água pelas culturas. Segundo SIONIT e KRAMER (1977), em condições que limitam a disponibilidade de água, a magnitude dos efeitos do estresse depende da fase de desenvolvimento da planta. As fases vegetativas, em geral, são bem menos

sensíveis que as fases de florescimento e enchimento de grãos (DOORENBOS e KASSAM, 1979; SALINAS et al., 1989).

O uso eficiente da água (UEA) é definido como a razão entre o peso da matéria seca produzida e a evapotranspiração ou água consumida (KLAMER e BOYER, 1995). A determinação do UEA em diferentes fases fenológicas na cultura da soja auxilia no manejo do ambiente e apresenta tendência ao melhor uso eficiente da água quando a cultura está em estresse hídrico na fase vegetativa (PEREIRA, 1998).

A temperatura é um dos elementos que influenciam diretamente o desenvolvimento da cultura em todas as fases. Para completarem cada fase do crescimento, as plantas necessitam de determinada quantidade de energia. Existem vários métodos na literatura que relacionam o grau de desenvolvimento de uma cultura com a temperatura do ar, sendo o mais empregado a soma das unidades térmicas ou graus-dia.

O conceito de graus-dia baseia-se no acúmulo térmico, dentro dos limites nos quais a planta se desenvolve, definidos pelas temperaturas basais inferior e superior. Cada grau de temperatura acima da temperatura-base corresponde a um grau-dia. Cada cultivar possui uma temperatura-base, que pode variar em função da fase fenológica da planta, sendo comum adotar-se um valor médio para todo o ciclo da cultura para facilitar sua aplicação (CAMARGO, 1984).

O conceito de graus-dia contém uma série de aproximações que se tornam motivo freqüente de críticas ao seu uso. Dentre essas aproximações, destacam-se a temperatura-base, que é assumida como única durante o ciclo da planta; e as temperaturas diurnas e noturnas, que têm igual importância no seu crescimento e desenvolvimento. WANG (1960) e MASSIGNAM e ANGELOCCI (1993) explicaram que as plantas respondem diferentemente aos mesmos elementos climáticos durante as fases de desenvolvimento, enfatizando o fato de que a exigência em graus-dia é constante somente naquela amplitude em que existe a linearidade entre o crescimento relativo e a temperatura.

Apesar das críticas a respeito da utilização de graus-dia para estimar a duração de um estágio fenológico ou do ciclo das plantas, os

resultados obtidos em diversos estudos têm sido muito satisfatórios (GILMORE JUNIOR. e ROGERS, 1958; ARNOLD, 1959; OWEN, 1971; BERLATO et al., 1978; NUÑEZ, 1986; GAO et al., 1992).

Dada a necessidade, cada vez maior, de obter estimativas mais precisas da taxa de crescimento e, conseqüentemente, da produtividade das culturas, em respostas às condições ambientais, vários estudos vêm sendo desenvolvidos recentemente, em diferentes partes do mundo, voltados para a obtenção de métodos simples e eficientes para determinação da taxa de crescimento das culturas. Tais estudos têm levado à conclusão de que um modelo simples e eficiente deve considerar dois princípios fundamentais:

1. Os parâmetros devem ter significados fisiológicos, ou seja, não basta realizar simplesmente um ajuste entre os elementos climáticos e a produção de matéria seca.

2. O modelo deve ser obtido por meio da taxa de crescimento da matéria seca (w) com o tempo (t), ou seja, por intermédio da diferencial dw/dt .

Com base nesses princípios, GOUDRIAAN e MONTEITH (1990) desenvolveram um modelo que permite acompanhar a evolução da taxa de produção de matéria seca das culturas, ao longo do tempo. A base fisiológica do modelo é que a taxa de crescimento de qualquer cultura é proporcional à radiação interceptada. O modelo é dividido em duas fases distintas. Na primeira fase, o crescimento da cultura abrange plantas jovens isoladas, sem sombreamento mútuo, e ocorre em forma exponencial. Na segunda fase, quando a máxima interceptação de radiação é alcançada, o crescimento passa a ocorrer na forma linear.

O modelo proposto por esses autores é denominado modelo expolinear e tem a seguinte forma:

$$W = (C_m/R_m) \ln \{1 + \exp(R_m(t - t_b))\} \quad \text{Eq. 1}$$

em que

W = matéria seca produzida no tempo t (g m^{-2});

C_m = taxa máxima de crescimento absoluto ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

R_m = taxa máxima de crescimento relativo ($\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$); e

t_p = parâmetro de tempo, ou tempo perdido (d).

Estudos realizados com o modelo expolinear têm evidenciado que o modelo é capaz de prever o acúmulo da matéria seca de culturas crescendo em condições de campo (GOUDRIAAN, 1994; TEI et al., 1996). Entretanto, em razão dos diversos fatores que influenciam a relação radiação planta-ambiente, seu uso mais intensivo exige que ela seja testada com dados de diferentes culturas, em diferentes condições ambientais, principalmente em condições tropicais.

Devido à grande importância econômica da cultura da soja para o Estado de Minas Gerais e para o Brasil, é importante realizar estudos mais detalhados, com o objetivo de desenvolver métodos simples e eficientes para estudo do crescimento da cultura em resposta às variações das condições ambientais.

A produtividade da soja é mais afetada pelo estresse hídrico durante a fase de florescimento até o desenvolvimento da vagem e na fase de enchimento de grão do que durante a fase vegetativa (SALINAS et al, 1989).

O estresse hídrico apresenta forte tendência para diminuir a área foliar e o acúmulo de matéria seca total, além de induzir algumas alterações morfológicas nas plantas (PEREIRA, 1998). Tais alterações dependem do estágio de desenvolvimento da cultura, podendo causar efeitos diferenciados nos mecanismos de captura e utilização da radiação (CONFALONE, 1998).

No que se refere à resposta ao ambiente térmico, a temperatura ótima para a germinação da semente da soja é próxima de 30°C . A 18°C , ou menos, não há formação das vagens, e o tamanho das sementes é maior quando as vagens são cultivadas a 27°C , sendo o número de vagens por planta maior a 30°C (SEDIYAMA et al., 1993).

Com o intuito de quantificar os elementos climáticos que influenciam o crescimento e o desenvolvimento da soja, através do modelo expolinear, o presente trabalho teve como objetivos:

- 1) Testar o ajuste do modelo expolinear na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) crescendo em condições de campo em diferentes condições de disponibilidade hídrica e de intensidade de radiação.
- 2) Avaliar a sensibilidade dos parâmetros do modelo em diferentes condições de disponibilidades hídrica e de intensidade de radiação.
- 3) Testar a possibilidade de utilizar o modelo expolinear para substituir a variável independente da equação, ou seja, dias por graus-dia, água evapotranspirada e radiação interceptada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de coleta dos dados

Três experimentos foram conduzidos na Estação Experimental Vila Chaves, localizada no "Campus" da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98 e 1998/99.

A área experimental apresentava topografia plana, cujo solo foi classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo, câmbico, fase terraço (COSTA, 1973). O solo foi preparado de modo convencional nos três experimentos, recebendo em seguida adubação básica de 30 kg de K_2O /ha e 60 kg de P_2O_5 /ha, na forma de cloreto de potássio (KCl) e superfosfato simples (SS).

2.2. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos de temperaturas mínima, média e máxima, precipitação, umidade relativa e evapotranspiração, nos anos agrícolas estudados, foram obtidos em um posto meteorológico instalado no referido campo experimental.

2.2.1. Medidas de radiação solar

As medições da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foram efetuadas em torno das 12 horas do local do experimento, por meio de um ceptômetro (Modelo Delta T – Devices), em quatro diferentes níveis do dossel, ou seja, superior, inferior e dois níveis intermediários, em 10 plantas de cada parcela, no mesmo dia das coletas das amostras. No ano agrícola 1997/98, devido a problemas no instrumento, as medições foram realizadas a partir de 40 dias após a emergência (DAE). Dessa forma, não foi possível utilizar os dados deste ano para o ajuste do modelo expolinear.

2.3. Delineamento experimental e tratamentos

Os tratamentos foram aplicados 30 dias após o plantio no primeiro ano agrícola 1995/96. A densidade de plantio foi de 22 plantas por metro quadrado, em parcelas de 6,0 m de largura por 10,5 m de comprimento, contendo 15 fileiras cada e espaçamento de 0,7 m entre fileiras. Os tratamentos nos anos agrícolas 1997/98 e 1998/99 foram aplicados antes da emergência das plantas. O tamanho das parcelas foi de 6,0 m de largura por 12 m de comprimento, contendo 17 fileiras cada e espaçamento similar ao do ano agrícola 1995/96.

Nos três anos agrícolas, foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas; os principais tratamentos consistiram-se em deficiência hídrica e deficiência de radiação nas diferentes fases e os tratamentos secundários, nas épocas de amostragem (de dois em dois dias para as primeiras cinco semanas e sete em sete dias para o restante), com duas repetições nos anos agrícolas 1995/96 e 1998/99, e três repetições em 1997/98.

Os tratamentos aplicados nos diferentes anos agrícolas são apresentados na Quadro 1.

Quadro 1 - Tratamentos utilizados em diferentes anos agrícolas

Anos Agrícolas		Tratamentos		
1995/96	IPTP ¹	NIFV ²	NIFF ³	NITP ⁴
1997/98	IPTP	NIFV	NIFF	ISFV ⁵
1998/99	IPTP	NIFV	NIFF	ISFV

¹ Irrigado por todo o período, ² não-irrigado na fase vegetativa, ³ não-irrigado na fase de florescimento, ⁴ não-irrigado por todo o período, ⁵ irrigado e sombreado na fase vegetativa.

Nos anos agrícolas 1997/98 e 1998/99, nos tratamentos não-irrigados, foram construídas tendas medindo 2,50 m de pé-direito e altura no centro de 3,0 m, cobertas com plástico (polietileno transparente), para evitar a chuva direta sobre a cultura. O sombreamento artificial foi obtido com telas plásticas (sombrite), que proporcionaram sombreamento em torno de 50% da radiação solar incidente. As telas foram pregadas em armações de madeira a 1,50 m de altura do solo.

2.4. Plantio

A semeadura da soja foi realizada manualmente nos três anos agrícolas. Os plantios foram realizados nos dias 8 de dezembro de 1995, 12 de dezembro de 1997 e 9 de dezembro de 1998.

Nos anos agrícolas de 1995/96 e 1998/99, a semeadura do cultivar UFV-16 foi feita com a inoculação de *Rhizobium japonicum* nas sementes. Já no ano agrícola 1997/98, foi aplicada a fertilização nitrogenada antes da semeadura e 15 dias após o plantio.

2.5. Sistema de irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi a microaspersão, com mangueiras flexíveis do tipo SANTAPE I, que foi disposto no campo em oito linhas laterais por parcela. Esse sistema funcionou em uma pressão de serviço em torno de 2 mca e apresentou espaçamento entre emissores de 0,15 m e vazão de 3,8 l/s, com diâmetro de área molhada em torno de 2,5 m. A distribuição de emissores por planta foi de 0,33 emissor por planta, sendo o coeficiente de uniformidade considerado em torno de 95%.

O manejo da irrigação foi realizado mediante a estimativa de evapotranspiração pelo método do tanque classe A. A reposição da lâmina de água perdida era feita no final de cada dia. A lâmina a ser aplicada era calculada, multiplicando-se o valor da evaporação do tanque Classe A (ETCA) pelo valor do coeficiente do tanque (K_t), considerado como 0,75. Esse resultado foi multiplicado pelo valor do coeficiente da cultura (K_c), que variou ao longo do cultivo (0,4 a 1,15). O valor da evapotranspiração da cultura (ET_c) era, então, multiplicado pela área total das parcelas, sendo um volume de água equivalente medido no hidrômetro instalado no experimento.

2.6. Amostragem da cultura

Nos três experimentos dos anos agrícolas 1995/96, 1997/98 e 1998/99, a coleta das amostras da cultura constituiu de 10 plantas coletadas de dois em dois dias nos primeiros 30 DAP, e a partir daí a coleta passou a ser de 10 plantas a cada sete dias, em todos os tratamentos.

Após serem coletadas, as plantas foram levadas para estufa com ventilação forçada, onde foram secadas em temperatura de 72°C, por 72 horas, e, depois, pesadas em balança de precisão, para determinação da matéria seca.

A área foliar das plantas foi medida, utilizando-se um medidor eletrônico (Modelo LI-3100, LI-COR, Inc., Lincoln, NE).

2.7. Graus-dia

Para o cálculo dos graus-dia necessários para o complemento do ciclo plantio/maturação, foi utilizada a seguinte equação (ARNOLD, 1959).

$$GD = \frac{T.máx. + T.mín.}{2} - t_b \quad \text{Eq. 2}$$

em que

GD = graus-dia acumulados pela planta no período, °C. d;

T. máx. = temperatura máxima ocorrida durante o dia, °C;

T. mín. = temperatura mínima ocorrida durante o dia, °C; e

t_b = a temperatura-base escolhida (°C).

2.8. Modelo expolinear

Para ajuste dos dados de crescimento da cultura da soja, utilizou-se o modelo expolinear, apresentado na equação 1. Os parâmetros do modelo expolinear foram ajustados aos dados reais, mediante o ajuste não-linear, a fim de verificar o comportamento do modelo expolinear em relação a dias (d), graus-dia (GD), evapotranspiração acumulada da cultura (ETac) e radiação acumulada interceptada (RAI).

O cálculo da evapotranspiração acumulada da cultura foi realizado por meio do modelo SISDA. Na simulação foram utilizados os dados climatológicos da estação experimental e foi criada uma parcela para cada tratamento para verificar a evapotranspiração em cada tratamento específico.

A radiação interceptada acumulada foi calculada, multiplicando-se a radiação fotossinteticamente ativa pela fração de radiação interceptada diariamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Condições climáticas durante os três anos agrícolas

Nas Figuras 1 a 3, mostra-se a variação das temperaturas médias, máximas e mínimas diária desde a semeadura até a fase de maturação da cultura, nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98 e 1998/99.

Os resultados indicaram que, em geral, os maiores valores de temperaturas do ar média, máxima e mínima ocorreram em 1997/98. As médias das máximas foram de 29,2; 30,1; e 29,4, nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98 e 1998/99, respectivamente. Correspondentemente, os valores médios das temperaturas mínimas foram 18,5; 19,7; e 18,4 (Figuras 1 a 3). Esses dados evidenciaram, ainda, que a temperatura média diária nos três anos agrícolas esteve entre 19°C e 29°C, faixa considerada satisfatória para o crescimento da soja. Um resumo das variações da temperatura durante o ciclo da cultura, nos três anos agrícolas, é apresentado no Quadro 3.

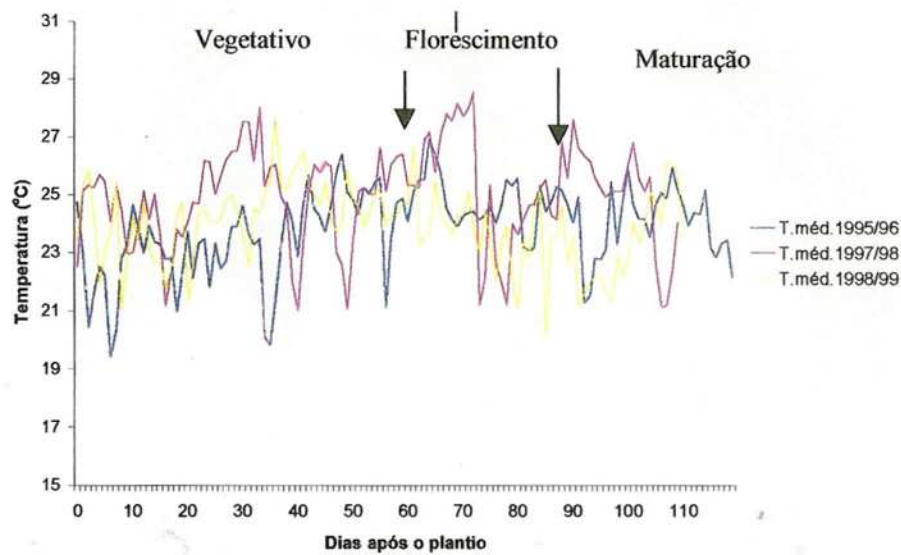


Figura 1 - Temperatura média diária durante o período experimental.

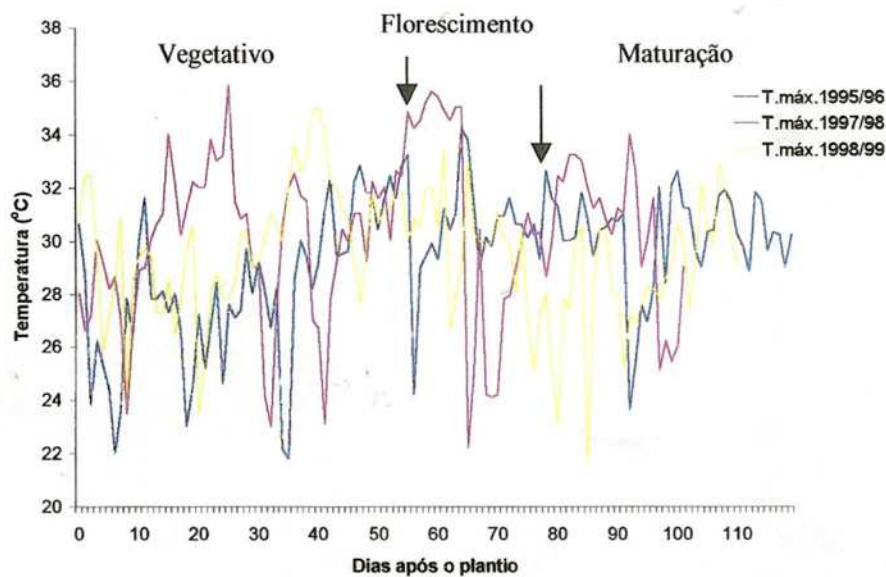


Figura 2 - Temperatura máxima ocorrida durante o período experimental.

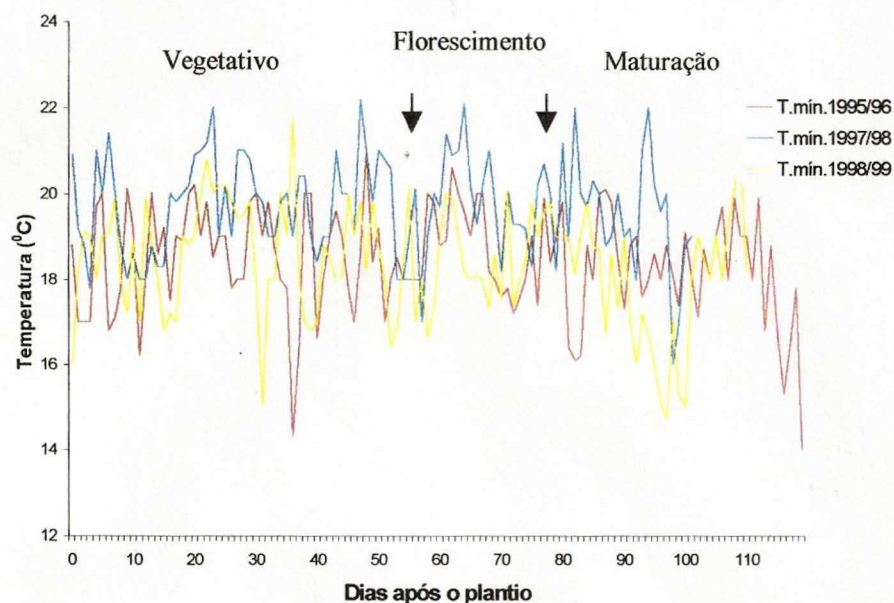


Figura 3 - Temperatura mínima ocorrida durante o período experimental.

Os valores das precipitações, nos três anos agrícolas, estão apresentados na Figura 4. Uma análise mais detalhada dos resultados indicou que, no ano agrícola 1995/96, ocorreu um veranico de 19 dias no final da fase vegetativa, entre os 35 e 53 dias após a emergência (DAE). Em 1997/98, as precipitações foram menores na fase vegetativa, em relação aos outros anos, e atingiram valores mais altos na fase de maturação.

Os totais de precipitação nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98 e 1998/99 foram, respectivamente, de 403; 299,2; e 241,2 mm na fase vegetativa; 86; 107,2; e 78,9 mm na fase de florescimento; e 70; 161,9; e 287,3 mm na fase de maturação. Os totais mensais de precipitação são apresentados no Quadro 3.

A quantidade de precipitação foi satisfatória nos três anos agrícolas, porém ocorreu de forma irregular, com maiores precipitações na fase de crescimento inicial da cultura.

A radiação solar global média oscilou muito entre os três anos agrícolas (Figura 5). Os valores de R_g nos anos 1995/96, 1997/98 e 1998/99 foram, na fase vegetativa, de 15,78; 16,44; e 17,04 MJ.m^{-2} ; na fase de florescimento, de 19,55; 18,47; e 19,27 MJ.m^{-2} ; e na fase de maturação, de 17,37; 16,39 e 16,33 MJ.m^{-2} .

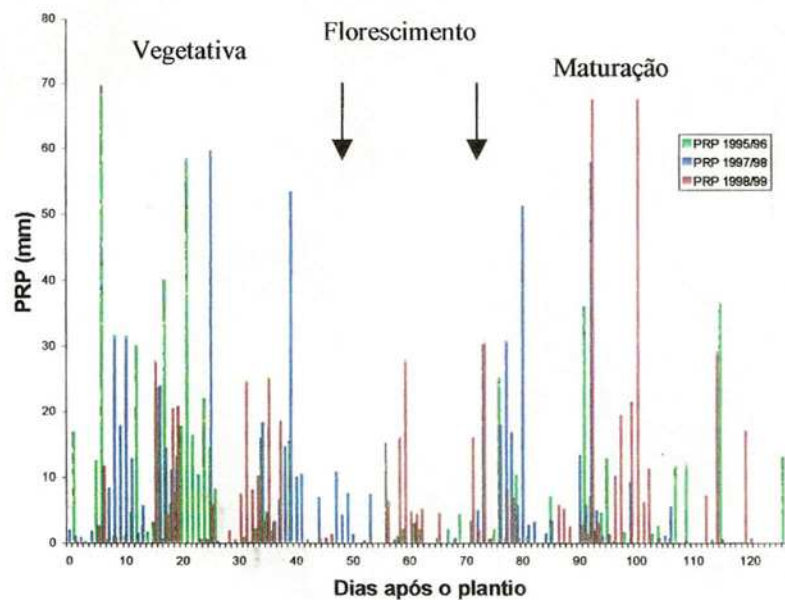


Figura 4 - Precipitação pluvial ocorrida durante os períodos experimentais.

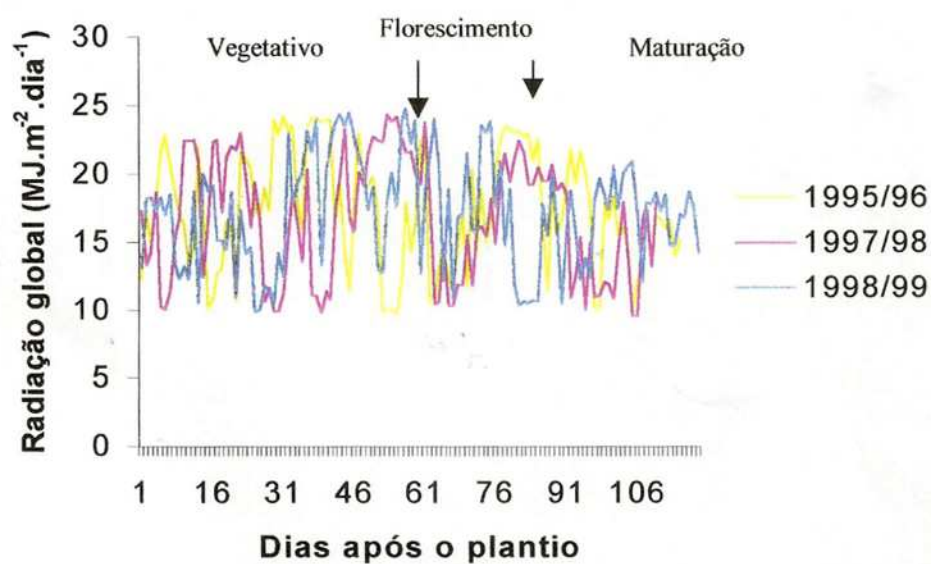


Figura 5 - Radiação solar global ocorrida durante os períodos de estudo.

Quadro 2 - Médias mensais de radiação, precipitação total e temperatura (média) do ciclo da cultura da soja, nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98 e 1998/99

Meses	Radiação (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)			Precipitação Total (mm)			Temperatura Média (°C)		
	95/96	97/98	98/99	95/96	97/98	98/99.	95/96	97/98	98/99
DEZ.	14,0	13,8	15,7	342,0	238,9	98,30	21,7	24,8	22,4
JAN.	18,0	15,9	18,1	85,0	157,7	154,2	23,0	25,0	23,6
FEV.	19,1	16,3	18,5	73,0	169,1	88,1	23,5	25,2	23,0
MAR.	16,5	16,3	16,5	99,0	78,7	273,7	23,0	24,6	22,1

3.2. Crescimento da cultura da soja nos diferentes anos agrícolas, utilizando-se a função expolinear e considerando o tempo, ou seja, dias após o plantio, como variável independente

Os ajustes da função expolinear dos diferentes anos agrícolas e tratamentos são apresentados nas Figuras 6 a 8.

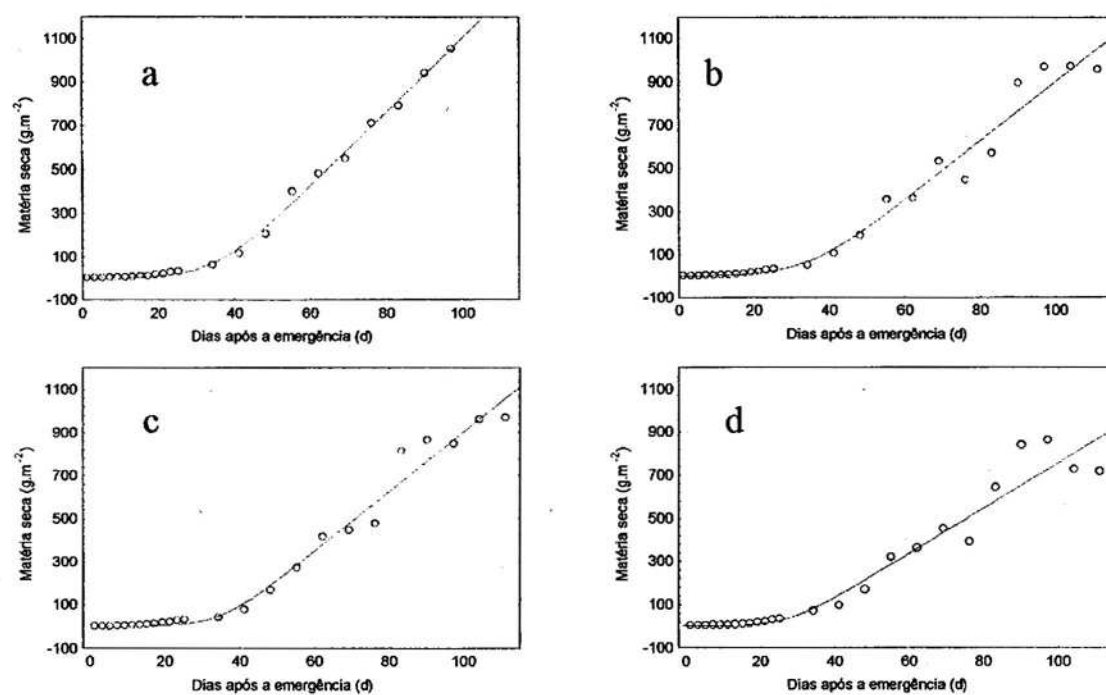


Figura 6 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1995/96: a) IPTP, b) NIFF, c) NIFV e d) NITP.

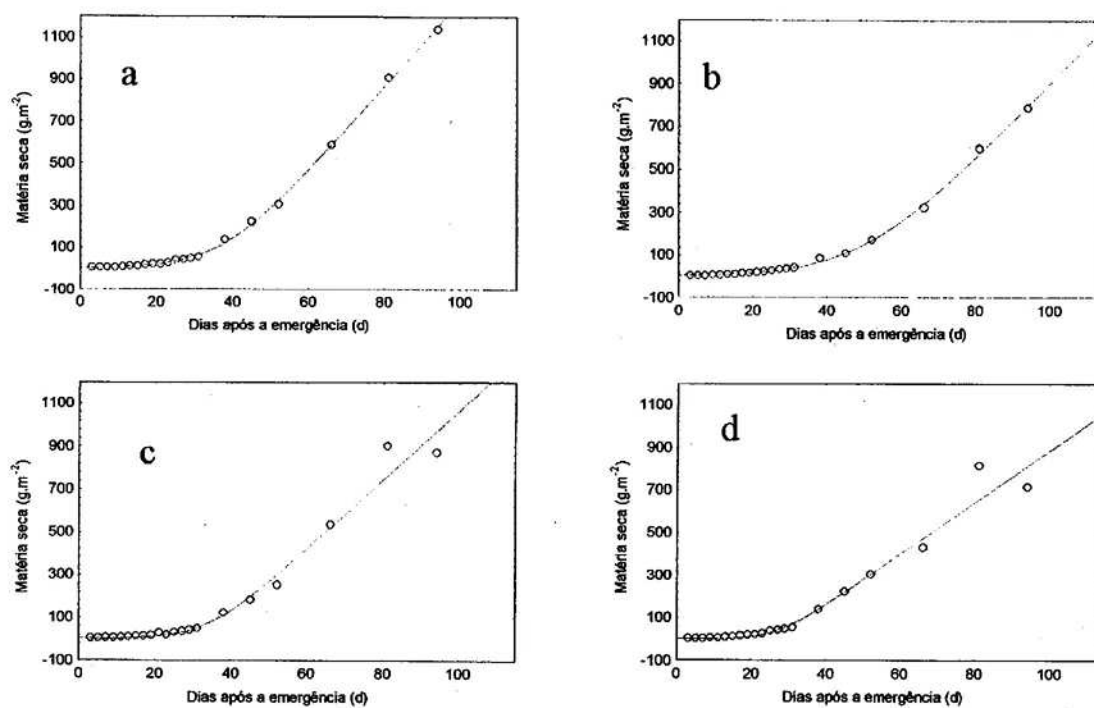


Figura 7 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1997/98: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFV e d) NIFF.

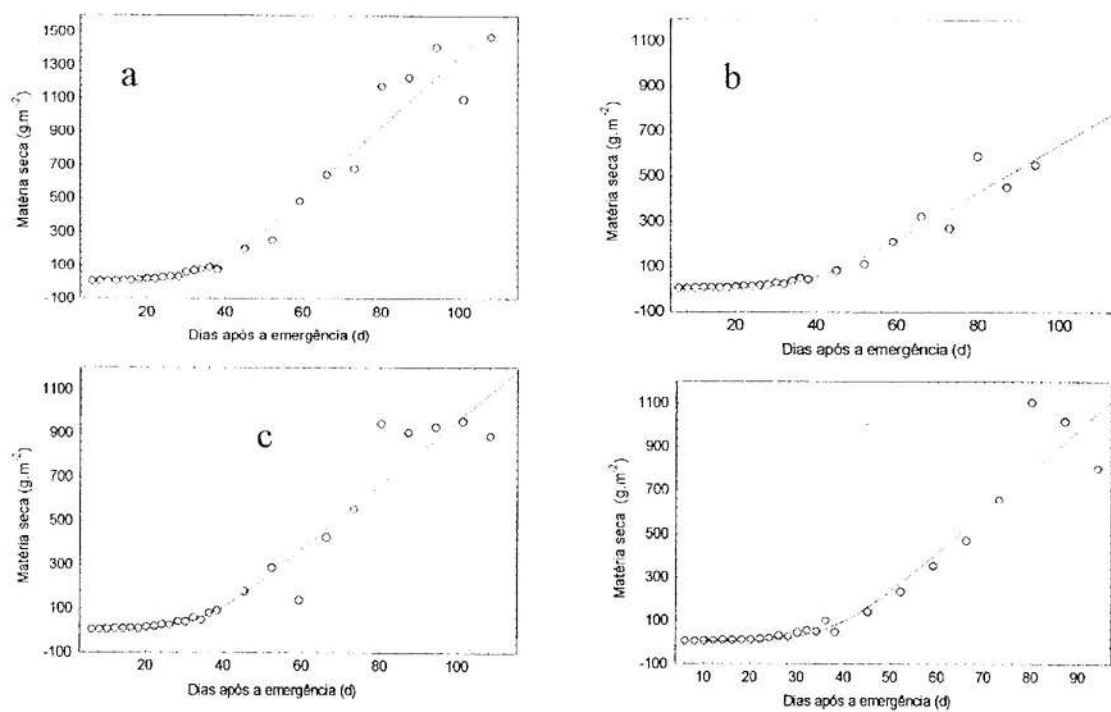


Figura 8 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1998/99: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFV e d) NIFF.

Em geral, observou-se que o modelo expolinear apresentou bom ajuste nos diversos tratamentos considerados nos diferentes anos agrícolas (Figuras 5 a 7). Os valores de R^2 , bem como dos parâmetros estimados nos diferentes tratamentos, são apresentados no Quadro 3. Os resultados indicaram que os valores de R^2 variaram entre 0,887 e 0,999, o que indica a boa qualidade de ajuste da função aos dados observados.

Os valores do parâmetro R_m , ou seja, a taxa de crescimento relativo, variaram de 0,08 a 0,35 $g\ g^{-1}d^{-1}$, sendo o menor valor obtido no tratamento ISFV, no ano agrícola 1997/98, e o maior no tratamento NIFF, no ano agrícola 1998/99 (Quadro 3). Os resultados indicaram ainda baixa confiabilidade da estimativa do parâmetro R_m , principalmente no ano agrícola 1998/99. Os valores de R_m no tratamento IPTP, comum nos três anos agrícolas, variaram entre 0,12 e 0,18 $g.g^{-1}d^{-1}$, com maiores confiabilidades em relação aos valores obtidos nos anos agrícolas 1995/96 e 1997/98. Os tratamentos sem irrigação na fase vegetativa NIFV apresentaram valores de R_m entre 0,16 e 0,18 $g.g^{-1}d^{-1}$; no entanto, todas as estimativas exibiram baixo grau de confiabilidade (Quadro 3). Da mesma forma, os valores de R_m nos tratamentos não-irrigados, na fase de florescimento, apresentaram valores entre 0,20 e 0,35 $g\ g^{-1}d^{-1}$ e baixo grau de confiabilidade.

Analisando os valores de R_m obtidos no presente estudo, observou-se que, em geral, eles se encontravam dentro dos valores esperados com culturas crescendo em condições de campo, ou seja, entre 0,1 e 0,2 $g\ g^{-1}d^{-1}$ (TEI et al. 1996; GOUDRIAAN e MONTEITH, 1990; KOLLER, 1970). Somente o valor de R_m ajustado para o tratamento NIFF se encontrava fora dessa faixa. A razão do alto valor de R_m encontrado nesse tratamento foi a mesma que fez com que, no geral, a estimativa de R_m apresentasse baixa confiabilidade. Teoricamente, os valores de R_m representam a taxa de crescimento da cultura, enquanto esta se comportavam como plantas isoladas, ou seja, na fase de crescimento exponencial. No entanto, devido à característica dessa função, o valor ajustado de R_m foi afetado pelo que ocorreu nas outras fases. No entanto, fisiologicamente, o comportamento da cultura em sua fase linear não pode ter interferido em seu comportamento na fase exponencial.

Quadro 3 - Taxa de crescimento máximo (C_m), taxa de crescimento relativo (R_m), tempo perdido (t_p), desvio-padrão e valores de R^2 nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98, 1998/99

Período de crescimento	Tratamento	$R_m \pm s.e$ ($g \cdot g^{-1} d^{-1}$)	$C_m \pm s.e$ ($g \cdot m^{-2} d^{-1}$)	$t_p \pm s.e$ (d)	R^2
1995/96	IPTP	0,15±0,036	16,95±0,538	34,95±1,403	0,997
	NIFF	0,14±0,089	13,78±1,135	34,24±4,386	0,976
	NIFV	0,18±0,164	13,84±0,838	34,73±3,051	0,982
	NITP	0,18±0,173	10,49±0,971	27,8±4,909	0,951
1997/98	IPTP	0,12±0,008	20,29±0,423	37,29±0,912	0,999
	ISFV	0,08±0,004	17,98±0,782	49,87±1,786	0,998
	NIFV	0,16±0,156	16,11±1,404	33,88±3,722	0,978
	NIFF	0,20±0,154	12,13±1,131	27,0±4,085	0,966
1998/99	IPTP	0,18±0,124	21,09±1,869	35,81±4,262	0,965
	ISFV	0,13±0,075	10,66±1,688	39,64±6,467	0,949
	NIFV	0,16±0,124	14,68±1,802	34,49±6,103	0,887
	NIFF	0,35±0,790	13,0±1,589	28,6±5,600	0,943

Os valores de C_m variaram de 10,49 a 21,09 $\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$, com maiores valores no IPTP em 1997/98 e menor em NITP 1995/96. Tais resultados indicam o efeito do estresse hídrico na redução da taxa de crescimento da cultura e a capacidade do parâmetro C_m em refletir tal efeito. Os valores de C_m no tratamento IPTP foram de 16,95 $\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ em 1995/96, 20,29 $\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ em 1997/98 e 21,09 $\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ em 1998/99. Todos os valores foram estimados com alto grau de confiabilidade. É importante observar que no ano agrícola 1998/99 ocorreram os maiores níveis de incidência de radiação na fase inicial da cultura (Quadro 3).

Os valores de C_m nos tratamentos não-irrigados na fase vegetativa foram de 13,84 em 1995/96, 16,11 em 1997/98 e 14,68 $\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ em 1998/99. Os valores de C_m nos tratamentos não-irrigados na fase de florescimento foram de 13,78 em 1995/96, 12,13 em 1997/98 e 13,0 em 1998/99. Os valores encontrados neste trabalho foram próximos dos obtidos por TEI et al. (1996), GOUDRIAAN e MONTEITH (1990), KOLLER et al. (1970) e GREEN et al. (1985).

Observou-se ainda que os valores de C_m , além de se apresentarem consistentes em relação à taxa de crescimento da cultura, mostraram alto grau de confiabilidade.

Os valores de t_p , ou seja, o tempo necessário para o fechamento do dossel, variaram de 27,8 a 49,87 dias. Considerando os três anos agrícolas, o tratamento que levou mais tempo para o fechamento do dossel foi o ISFV. Nos tratamentos comuns aos três anos, os valores de t_p variaram de 34,95 a 37,29 dias no tratamento IPTP, de 33,88 a 34,73 no NIFV e de 27,0 a 34,24 no NIFF.

O ajuste do valor de t_p foram altamente dependentes do ajuste da função na fase exponencial. Os tratamentos com bons ajustes em R_m Figuras 6 (a, b) e 7 (a,b) geralmente apresentaram menor desvio nos valores de t_p (Quadro 3).

No estudo realizado por GOUDRIAAN e MONTEITH (1990), os valores dos parâmetros da função expolinear na cultura de sorgo com densidade de 18,4 plantas por metro quadrado foram C_m $18,6 \pm 1,1 \text{ g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$, R_m $0,242 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ e t_p $26,8 \pm 4,1 \text{ d}$. TEI et al (1996), utilizando o modelo expolinear, encontrou, na cultura de alface com densidade de 17,6 plantas por metro quadrado, valores de $0,2031 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para R_m e de $18,1 \text{ g.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ para C_m . KOLLER et al. (1970),

utilizando o método tradicional, obtiveram uma taxa de crescimento máximo relativa de aproximadamente $0,13 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para a cultura da soja, com densidade de 24 plantas por metro quadrado. GREEN et al. (1985) observaram, na cultura de *Vicia faba* em tratamento semelhante ao IPTP, que os valores de C_m foram de $22,8 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para o cultivar Minica e $16,4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para o cultivar Alfred.

Os resultados encontrados neste estudo evidenciaram que, quanto menor a quantidade de radiação solar, menor o valor de R_m , o que também foi observado por MELGES (1983), segundo o qual as maiores intensidades de radiação proporcionaram maiores valores de R_m na cultura da soja. Tais resultados também indicaram que, em geral, o ajuste da curva foi muito bom em todos os tratamentos e em todos os anos. No entanto, para maior confiabilidade dos parâmetros R_m e t_p , são necessários mais estudos para minimizar os efeitos de ocorrências posteriores na sua determinação.

O parâmetro C_m foi capaz de mostrar sensibilidade aos efeitos dos tratamentos, com confiabilidade nos três anos agrícolas, ou seja, o grau de confiança na taxa de crescimento absoluto da cultura de soja foi considerado satisfatório através da função expolinear.

Como os parâmetros R_m , C_m e t_p se mostraram sensíveis a variações de temperatura, radiação e precipitação, nos parece apropriada a realização de estudos mais detalhados para expressar tais parâmetros em função dos elementos climatológicos.

3.3. Crescimento da cultura da soja nos diferentes anos agrícolas, utilizando-se a função expolinear e considerando graus-dia como variável independente

O ajuste da função expolinear utilizando graus-dia como variável independente apresentou bons ajustes nos diferentes tratamentos dos três anos agrícolas estudados (Figuras 9 a 11). Os valores de R^2 e dos parâmetros estimados nos diferentes tratamentos são apresentados no Quadro 4.

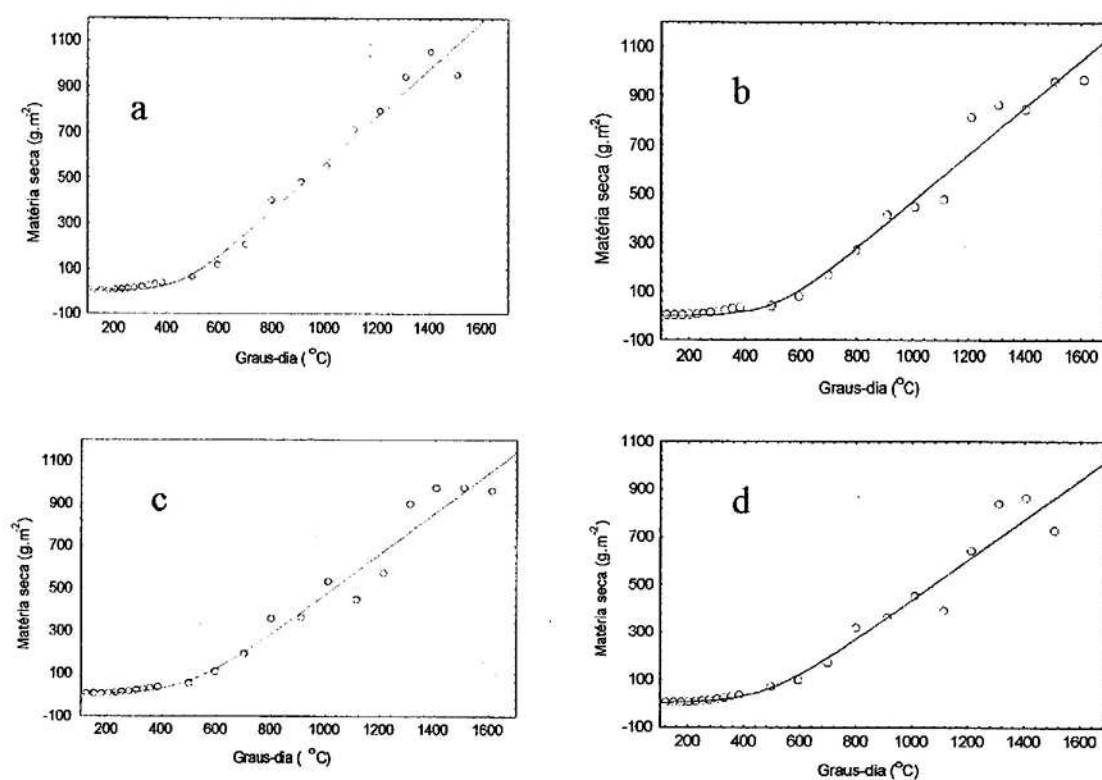


Figura 9 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1995/96: a) IPTP, b) NIFV, c) NIFF e d) NITP.

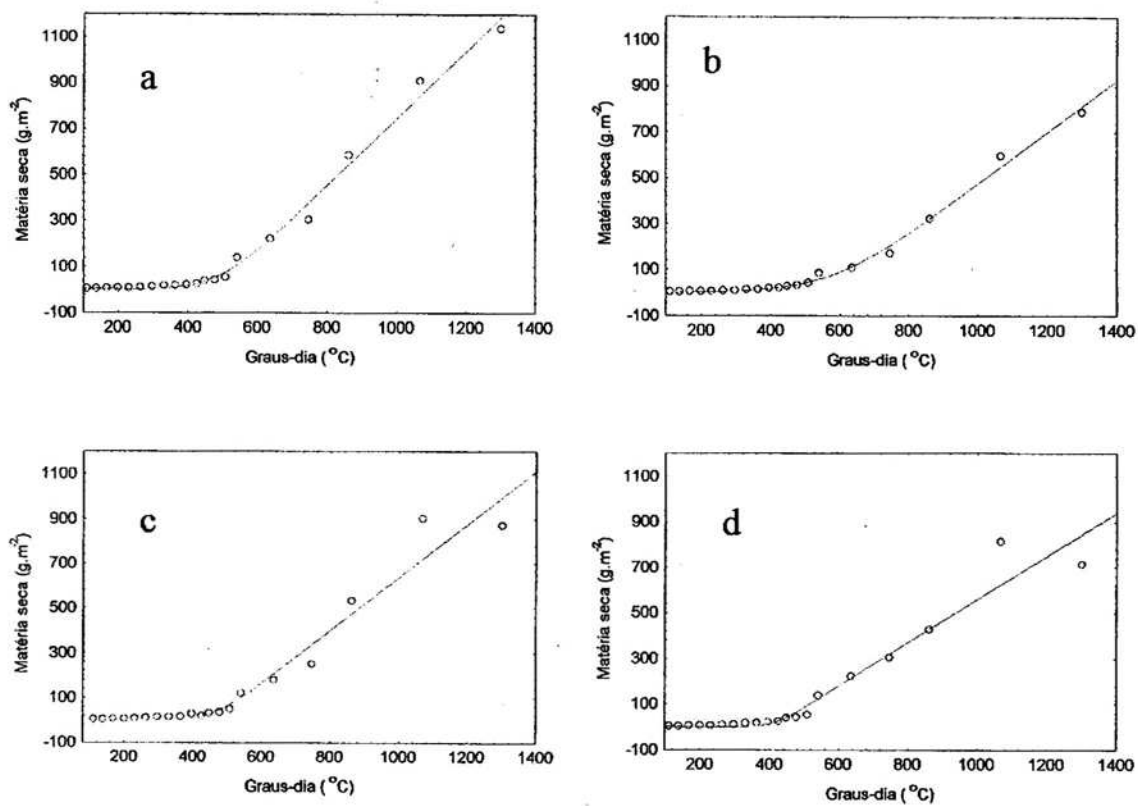


Figura 10 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1997/98: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFV e d) NIFF.

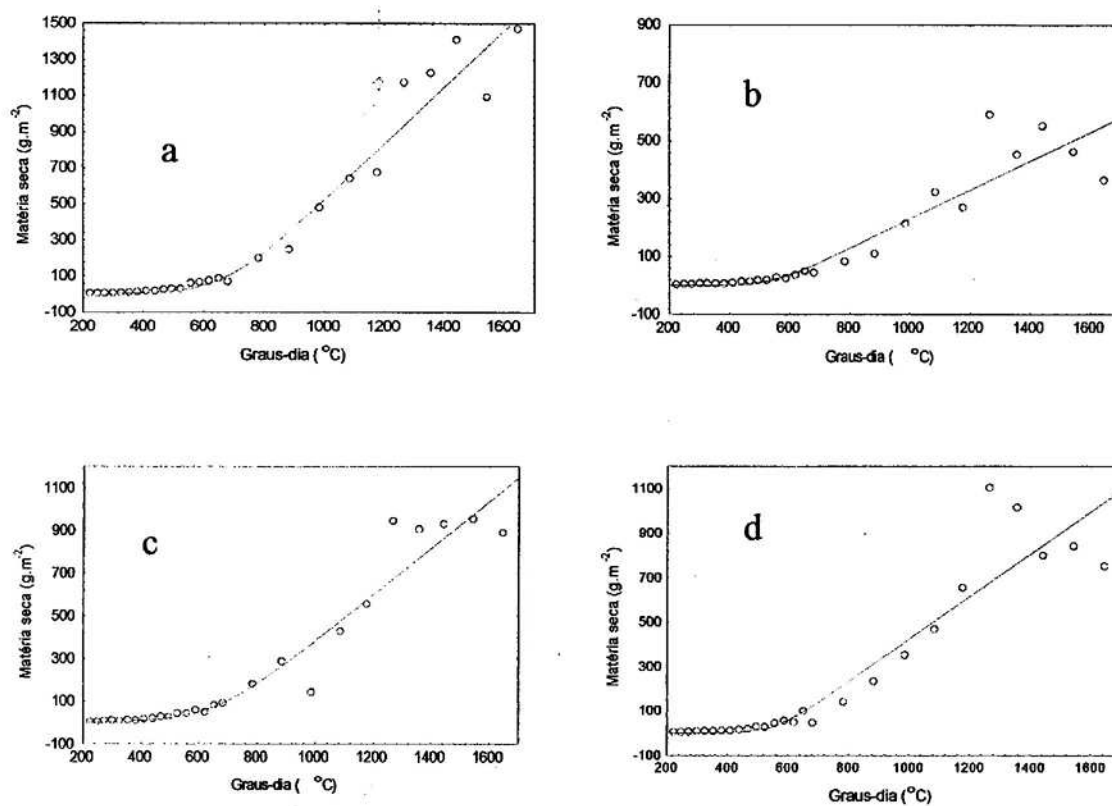


Figura 11 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1998/99: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFV e d) NIFF.

Os valores de R^2 variaram entre 0,881 e 0,994 nos três anos agrícolas, indicando o bom ajuste da função expolinear por meio de graus-dia.

A taxa de crescimento relativo (R_m) variou de 0,010 a 0,036 $\text{g.g}^{-1}\text{GD}^{-1}$, sendo os menores valores obtidos nos tratamentos NIFF e NITP no ano agrícola 1995/96, no ISFV no ano agrícola 1997/98 e no tratamento NIFV no ano agrícola 1998/99, ao passo que o maior valor foi no tratamento NIFF, no ano agrícola 1997/98 (Quadro 4).

Quadro 4 - Taxa de crescimento máximo (C_m), taxa de crescimento relativo (R_m), graus-dias (GD), desvio-padrão e R^2 nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98, 1998/99 em função de graus-dia

Período de crescimento	Tratamento	$R_m \pm s.e$ $g \cdot g^{-1}GD^{-1}$	$C_m \pm s.e$ $g \cdot m^{-2}GD^{-1}$	$t_p \pm s.e$ GD	R^2
1995/96	IPTP	0,014±0,007	1,04±0,047	457,7±30,809	0,98
	NIFF	0,010±0,005	0,95±0,078	502,8±62,236	0,97
	NIFV	0,012±0,008	0,96±0,056	511,7±42,164	0,98
	NITP	0,010±0,006	0,84±0,083	482,7±68,928	0,96
1997/98	IPTP	0,016±0,005	1,46±0,065	489,2±23,525	0,99
	ISFV	0,010±0,001	1,14±0,054	583,4±25,428	0,99
	NIFV	0,023±0,033	1,19±0,118	461,1±52,397	0,96
	NIFF	0,036±0,079	0,95±0,079	408,7±39,87	0,95
1998/99	IPTP	0,012±0,006	1,57±0,130	668,7±53,511	0,96
	ISFV	0,019±0,032	0,50±0,059	541,1±78,352	0,88
	NIFV	0,010±0,005	1,09±0,120	650,6±72,800	0,94
	NIFF	0,021±0,035	0,95±0,110	557,4±75,0	0,88

Os resultados indicaram que a utilização de graus-dia aumentou a confiabilidade do parâmetro R_m em quase todos os tratamentos e nos três anos agrícolas, com exceção dos tratamentos NIFV e NIFF, no ano agrícola 1997/98 e ISFV e NIFF em 1998/99 (Quadro 4).

A taxa de crescimento da cultura (C_m) apresentou o maior valor no tratamento IPTP ($1,57 \text{ g m}^{-2} \text{ GD}^{-1}$) e menor no tratamento ISFV ($0,50 \text{ g m}^{-2} \text{ GD}^{-1}$), ambos no ano agrícola 1998/99. É importante destacar que a radiação era cerca de 50% menor no tratamento ISFV. Os tratamentos não-irrigados na fase vegetativa apresentaram valores de C_m entre $0,96$ e $1,19 \text{ g m}^{-2} \text{ GD}^{-1}$ e boa confiabilidade na estimativa do parâmetro. Por sua vez, os tratamentos não-irrigados na fase de florescimento apresentaram valores variando entre $0,95$ e $1,15 \text{ g m}^{-2} \text{ GD}^{-1}$.

Os resultados encontrados no presente trabalho indicaram boa confiabilidade para a estimativa do parâmetro C_m , bem como evidenciaram que os parâmetros respondem adequadamente aos elementos meteorológicos.

A quantidade de graus-dia para o fechamento do dossel variou entre $457,7$ e $668,7 \text{ GD}$. Nos tratamentos não-irrigados, os valores variaram entre $408,7$ e $650,6 \text{ GD}$.

Os valores encontrados na literatura para a taxa de crescimento relativo R_m utilizando a função expolinear foram de $0,0277$; $0,0156$; e $0,0268 \text{ g.g}^{-1}\text{GD}^{-1}$ nas culturas de alface, cebola e beterraba, respectivamente (TEI et al., 1996).

Com relação aos valores de C_m , esses autores encontraram valores de $1,12 \pm 0,13 \text{ g.g}^{-1}\text{GD}^{-1}$ em alface, $2,42 \pm 0,11 \text{ g.g}^{-1}\text{GD}^{-1}$ em cebola e $2,38 \pm 0,11 \text{ g.g}^{-1}\text{GD}^{-1}$ em beterraba. Os valores observados na cultura da soja foram próximos aos encontrados em alface, mas bem inferiores aos valores verificados em cebola e beterraba, que são culturas que se caracterizam por grande acúmulo de matéria seca na fase linear.

As estimativas da taxa de crescimento relativo R_m utilizando graus-dia representaram melhor esses parâmetros no ano agrícola 1995/96 que a variável tempo. Da mesma forma, os parâmetros C_m e t_p apresentaram menor desvio, bem

como se mostraram sensíveis a variações dos elementos meteorológicos estudados.

O bom ajuste da função expolinear, em função de graus-dia, indicou o alto potencial dessa função em ser utilizada para determinação da taxa de crescimento da cultura da soja em regiões com diferentes características térmicas, bem como em diferentes épocas de plantio.

3.4. Crescimento da cultura da soja nos diferentes anos agrícolas, utilizando-se a função expolinear e considerando a evapotranspiração acumulada da cultura como variável independente

Utilizando a evapotranspiração da cultura como variável independente na função expolinear, torna-se possível a determinação da resposta da taxa de crescimento da cultura em função da disponibilidade de água, bem como do uso eficiente da água (UEA) na fase de crescimentos exponencial e linear. Os resultados do ajuste estão apresentados nas Figuras 12 a 14 e no Quadro 5.

Os valores de R^2 variaram entre 0,867 e 0,997, indicando o bom ajustamento da função aos dados da evapotranspiração acumulada da cultura (Figuras 12 a 14).

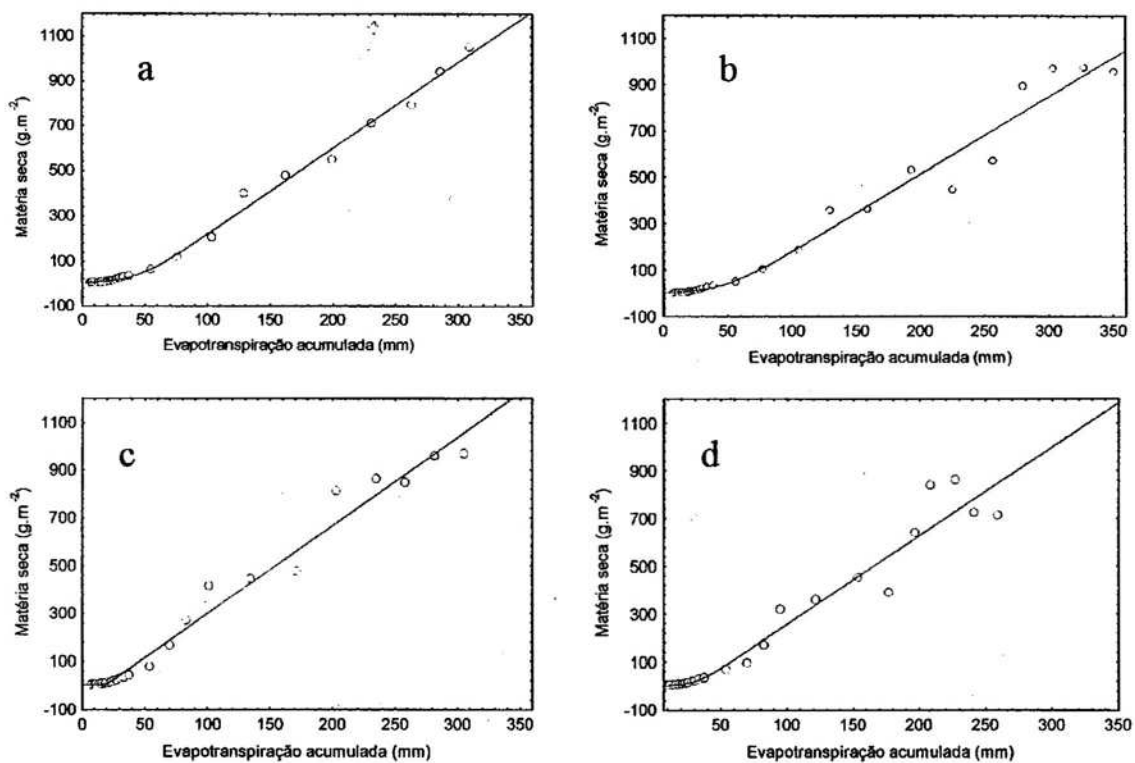


Figura 12 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos no ano agrícola 1995/96: a) ITP, b) NIFF, c) NIFV e d) NITP.

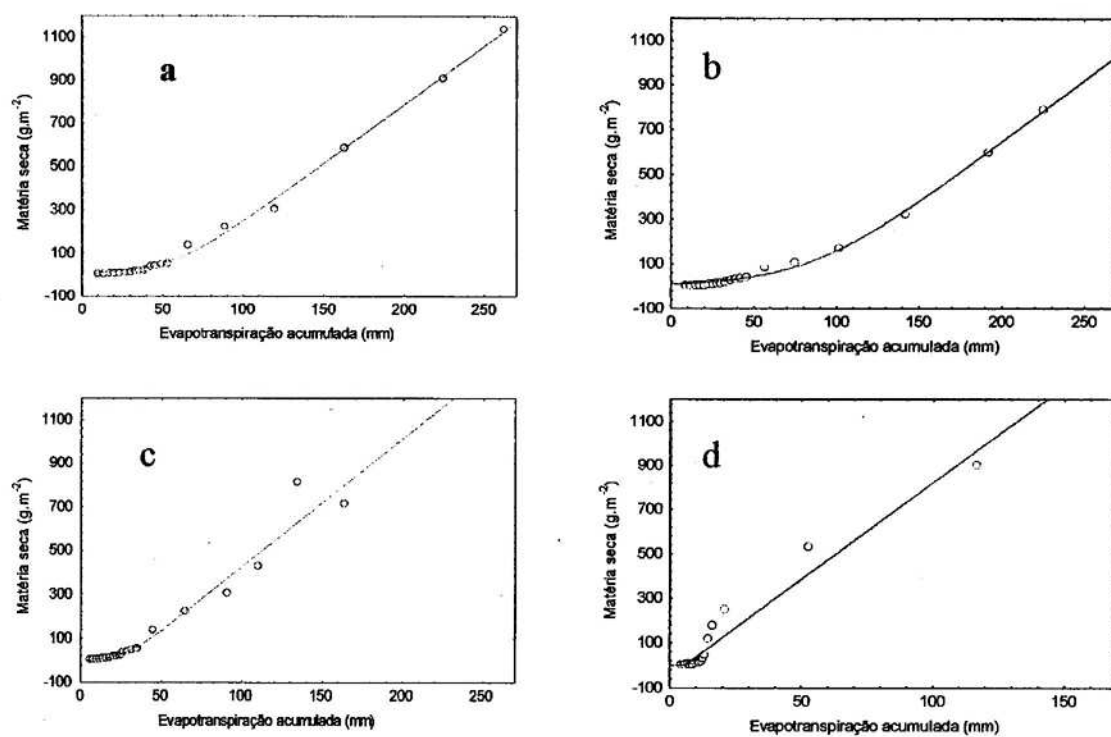


Figura 13 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1997/98: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFF e d) NIFV.

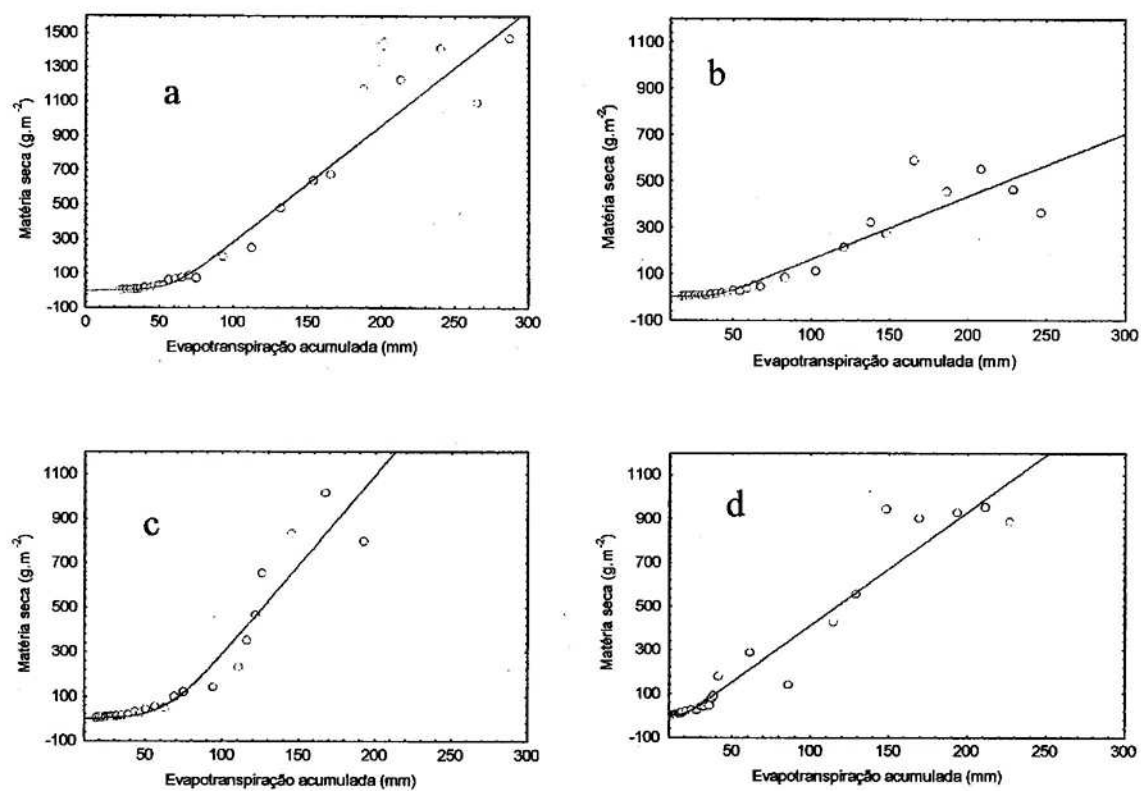


Figura 14 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1998/99: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFF e d) NIFV.

A taxa de crescimento relativo R_m , em função da evapotranspiração da cultura (ET_c), variou de 0,034 a 2,924 $g \cdot g^{-1} mm^{-1}$, sendo o menor valor encontrado no tratamento ISFV e o maior no tratamento NIFV, ambos em 1997/98. A confiabilidade nesse parâmetro, por meio da função expolinear, foi baixa em quase todos os tratamentos nos três anos de estudo, exceto nos tratamentos IPTP e ISFV em 1997/98 e IPTP em 1998/99 (Quadro 5).

Observou-se que o maior valor de R_m no tratamento não-irrigado na fase vegetativa (NIFV) em 1997/98 foi devido ao ajuste da curva Figura 13 (d), onde os pontos ficaram muito próximos, ou seja, evapotranspiração da cultura muito baixa e pouco aumento de matéria seca devido à falta de água nessa fase. Porém, quando volta a ser irrigada, aumenta a ET_c e ocorre um salto no crescimento da cultura. Esse fato dificulta o ajuste do parâmetro por apresentar um acúmulo de pontos na fase inicial.

O C_m , que nesse caso representa o uso eficiente da água na fase linear, variou de 2,71 a 8,70 $g \cdot m^{-2} mm^{-1}$ nos três anos agrícolas de estudo. Os tratamentos sombreados variaram entre 5,60 $g \cdot m^{-2} mm^{-1}$ em 1997/98 e 2,71 em 1998/99. O maior valor observado em 1997/98 parece estar ligado às características térmicas e hídricas desse ano agrícola. Os resultados indicaram que as altas temperaturas e a má-distribuição das chuvas naquele ano levaram a altos valores de C_m . Nos tratamentos não-irrigados, os parâmetros foram sensíveis aos efeitos do déficit hídrico, apresentando confiabilidade em todos os tratamentos (Quadro 5).

Os valores de t_p , que nesse caso indicou evapotranspiração perdida da cultura pelo não-fechamento do dossel, variaram entre 5,58 no tratamento NIFV e 85,10 mm no tratamento ISFV, ambos os valores em 1997/98. Os valores de t_p do tratamento IPTP variou entre 43,08 mm e 58,53 mm, com maior confiabilidade no valor obtido em 1997/98 (Quadro 5). Nos tratamentos não-irrigados, a variação foi de 5,58 a 64,38 mm, porém todas as estimativas apresentaram baixo grau de confiabilidade. Verificou-se que, nesse parâmetro, as estimativas em geral apresentaram baixo grau de confiabilidade. A razão pelo baixo nível de confiabilidade do parâmetro t_p foi a mesma já discutida

anteriormente. Observou-se também que os tratamentos estressados tinham tendência a utilizarem com mais eficiência a água disponível, ou seja, produziam mais matéria seca com menor quantidade de água, resultado também encontrado por PEREIRA (1998) e KRAMER e BOYER (1995).

Quadro 5 - Taxa de crescimento máximo (C_m), taxa de crescimento relativo (R_m), evapotranspiração da cultura (t_b), desvio-padrão e R^2 nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98, 1998/99

Período de crescimento	Tratamento	$R_m \pm s.e$ $g.g^{-1} mm^{-1}$	$C_m \pm s.e$ $g.m^{-2} mm^{-1}$	$t_b \pm s.e$ mm	R^2
1995/96	IPTP	0,071±0,022	3,82±0,114	43,08±5,196	0,995
	NIFF	0,060±0,045	3,35±0,231	46,65±13,873	0,973
	NIFV	0,424±1,805	3,69±0,131	18,64±5,084	0,981
	NITP	0,129±0,185	3,70±0,287	30,10±11,075	0,951
1997/98	IPTP	0,059±0,009	5,45±0,158	55,34±4,195	0,997
	ISFV	0,034±0,003	5,60±0,337	85,10±7,218	0,996
	NIFF	0,120±0,119	5,88±0,700	27,33±10,735	0,954
	NIFV	2,924±5,223	8,70±0,501	5,58±1,709	0,946
1998/99	IPTP	0,101±0,009	6,79±0,500	58,53±9,985	0,957
	ISFV	0,169±0,416	2,71±0,291	39,80±11,770	0,867
	NIFF	0,850±0,057	8,08±1,059	64,38±10,047	0,917
	NIFV	0,301±0,826	5,18±0,319	20,38±6,296	0,942

Os tratamentos sem irrigação indicaram a tendência de o NIFF em 1998/99 de ser maior que no tratamento IPTP, porém o NIFV apresentou a melhor eficiência no uso da água (8,69 g de MS/kg de água).

O modelo expolinear apresentou bons resultados de C_m na fase linear para a cultura da soja crescida em diferentes condições hídricas de radiação, embora quanto ao R_m e t_p esse modelo não tenha apresentado bons resultados, havendo a necessidade de ajustar o referido modelo para tais parâmetros.

A eficiência no uso da água na fase vegetativa foi menor no tratamento ISFV do ano agrícola 1998/99, em comparação com os valores de IPTP nesse mesmo ano. Tal diferença foi causada pelo sombreamento de 50%, que induziu menores taxas de transpiração, mas reduziu ainda mais o acúmulo de matéria seca Figura 13 (a, b) em 1997/98.

O ajuste do modelo expolinear, tendo como variável independente a água evapotranspirada, apresentou, no geral, um grande potencial para ser utilizada na determinação da produtividade da cultura, bem como para separação da água evapotranspirada nas fases exponencial e linear. No entanto, devido à complexibilidade dos fatores físicos e fisiológicos que afetam o fenômeno da evapotranspiração, estudos mais detalhados são necessários para se analisar o comportamento dos parâmetros R_m , C_m e t_p nas diferentes condições ambientais.

3.5. Crescimento da cultura da soja nos diferentes anos agrícolas, utilizando-se a função expolinear e considerando a radiação interceptada como variável independente

Neste tópico são analisados apenas os anos agrícolas 1995/96 e 1998/99, por motivo de erro instrumental em 1997/98. O ajuste do modelo expolinear foi satisfatório nos dois anos estudados Figuras 15 a 16. Os valores de R^2 , assim como os parâmetros estimados dos diferentes tratamentos, são apresentados no Quadro 6, no qual se verifica que os valores de R^2 variaram entre 0,955 e 0,997, indicando boa relação com os dados observados.

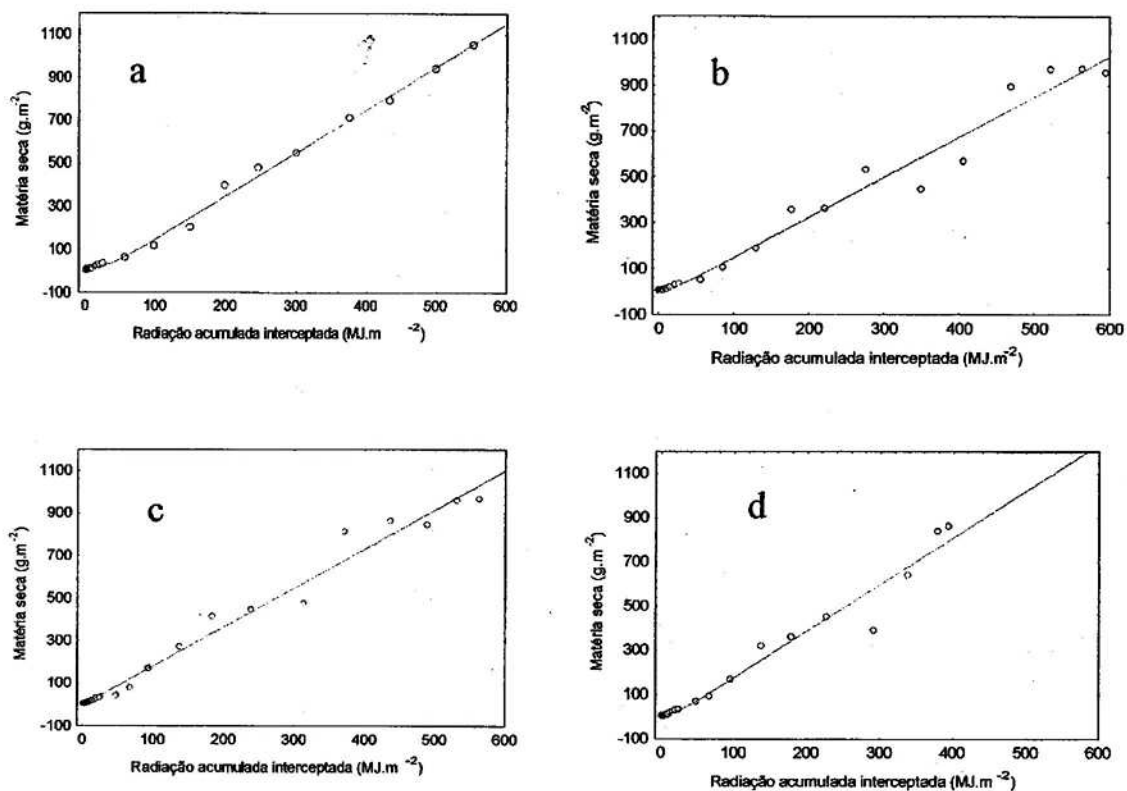


Figura 15 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1995/96: a) ITP, b) NIFF, c) NIFV e d) NITP.

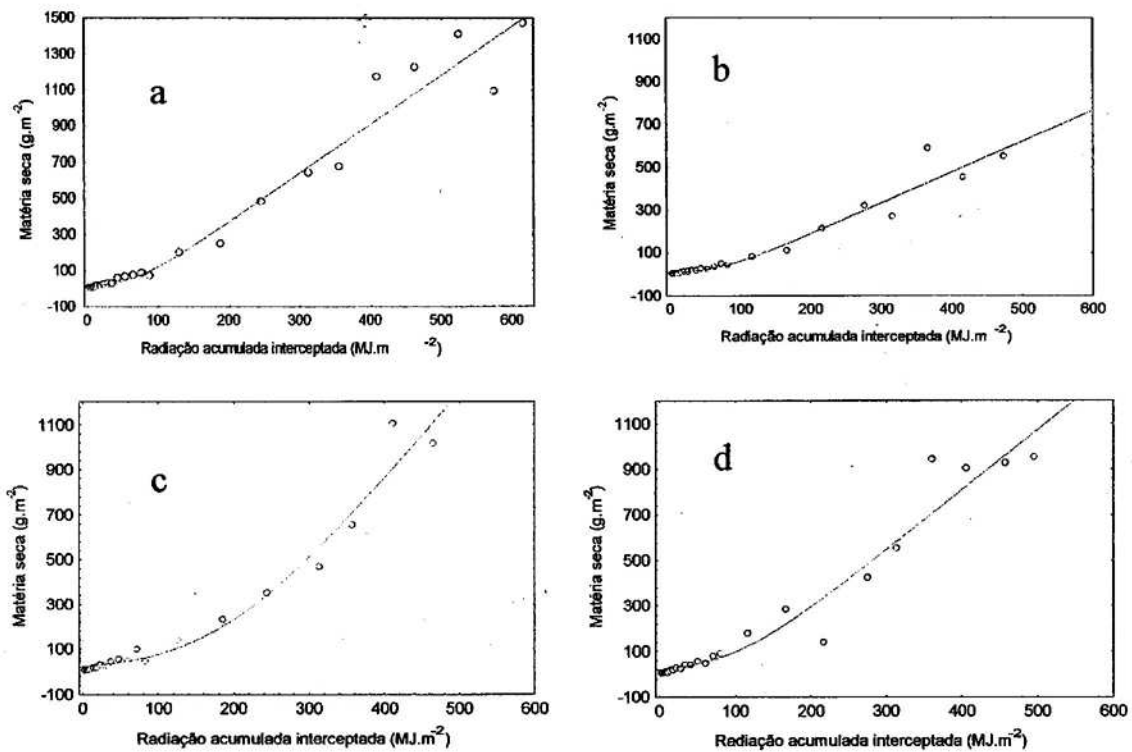


Figura 16 - Ajuste do modelo expolinear dos diferentes tratamentos do ano agrícola 1998/99: a) IPTP, b) ISFV, c) NIFF e d) NIFV.

A taxa de crescimento relativo em função da radiação R_m variou de 0,014 a 0,082 $\text{g.g}^{-1}\text{MJ}^{-1}$, sendo o menor valor encontrado no tratamento NIFF do ano agrícola 1998/99 e, o maior, no tratamento NITP do ano agrícola 1995/96 (Quadro 6).

Os resultados indicaram, novamente, baixa confiabilidade na estimativa desse parâmetro nos dois anos agrícolas, exceto nos tratamentos NIFV e NIFF, em 1998/99.

Os valores do uso eficiente de radiação na fase linear variaram de 1,45 a 3,87 $\text{g.m}^2 \text{MJ}^{-1}$. Nos tratamentos ITP, os valores variaram de 2,0 a 2,71 $\text{g.m}^2\text{MJ}^{-1}$, apresentando maior uso eficiente em 1998/99. Nos tratamentos não-irrigados na fase vegetativa, o uso eficiente foi próximo ou superior ao do tratamento ITP, indicando que o estresse hídrico causado na fase vegetativa não afetou demasiadamente o crescimento da cultura.

Quadro 6 - Taxa de crescimento máximo (C_m), taxa de crescimento relativo (R_m), radiação interceptada (t_b), desvio-padrão e R^2 nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98, 1998/99

Período de Tratamento		$R_m \pm s.e$ $g.g^{-1}.MJ^{-2}$	$C_m \pm s.e$ $g.m^{-2}. MJ^{-1}$	$t_b \pm s.e$ $MJ.m^{-2}$	R^2
1995/96	IPTP	0,057±0,019	2,00±0,045	25,3±7,177	0,997
	NIFF	0,078±0,104	1,76±0,088	15,6±18,025	0,978
	NIFV	0,385±2,698	1,84±0,061	1,82±9,349	0,984
	NITP	0,082±0,104	2,11±0,145	15,5±16,672	0,969
1998/99	IPTP	0,031±0,021	2,71±0,214	63,7±28,497	0,966
	ISFV	0,028±0,016	1,45±0,174	69,6±32,711	0,950
	NIFV	0,021±0,009	2,63±0,360	92,9±39,345	0,955
	NIFF	0,014±0,008	3,87±1,682	178,9±109,88	0,972

Observou-se que o maior valor encontrado no tratamento NIFF apresentou maior desvio. Uma vez que os valores de C_m , nesse caso, foram equivalentes aos do UER encontrados por CONFALONE, 1998.

A quantidade de radiação necessária para o fechamento do dossel, t_p , variou de 15,5 a 178,9 MJ.m⁻², sendo a menor quantidade em 1995/96 e, a maior, em 1998/99.

Fazendo comparação do UER na fase linear entre os tratamentos IPTP e ISFV do ano agrícola 1998/99, observou-se que, aparentemente, a eficiência do ISFV foi menor, porém a radiação interceptada na fase vegetativa, nesse tratamento, foi de 50%; então, nesse caso, o tratamento sombreado foi tão eficiente quanto o IPTP, ou seja, usou com muita eficiência a radiação interceptada.

O modelo expolinear apresentou bons resultados quanto à eficiência de uso da radiação na fase linear nos dois anos agrícolas analisados. Os valores de C_m se apresentaram bem próximos dos valores de UER obtidos pelo método convencional e se mostraram sensíveis às variações dos elementos ambientais estudados.

RESUMO E CONCLUSÕES

Objetivando verificar o comportamento da função expolinear e a sensibilidade de seus parâmetros às variações climáticas para comparar dados de crescimento estimados pelo modelo com dados experimentais obtidos para a cultura da soja crescendo em diferentes níveis de disponibilidade hídrica e de intensidade de radiação, foram realizados três experimentos de campo nos anos agrícolas 1995/96, 1997/98 e 1998/99. As análises do comportamento do modelo expolinear nesses diferentes anos agrícolas e distintos tratamentos indicaram o alto potencial dessa função em ser utilizada como ferramenta de previsão da produção de matéria seca em função das variáveis ambientais.

Os parâmetros C_m , R_m e t_b mostraram-se sensíveis às variações ambientais e coerentes com o pressuposto básico da função expolinear. O parâmetro C_m apresentou alto grau de confiabilidade em todos os tratamentos analisados, enquanto os parâmetros R_m e t_b apresentaram, em alguns casos, baixo grau de confiabilidade. As análises dos resultados indicaram que isso ocorre devido às características do ajuste estatístico da função, não invalidando o seu uso como indicadores da eficiência de crescimento da cultura. No entanto, tal comportamento deve ser objeto de estudos futuros.

A determinação da taxa de crescimento das culturas a partir de funções empíricas e simi-empíricas, tendo dias como variável independente, parece estar

superada, conforme evidenciado no presente estudo. Além do significado fisiológico dos parâmetros, melhores ajustes do modelo expolinear foram obtidos, utilizando-se graus-dia, água evapotranspirada e radiação interceptada como variável independente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLD, C.Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceeding of the American Society for Horticultural Science**, Geneve, v. 74, p. 430-445, 1959.

BARROS, A. H. C. **Análise do crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura do milho (*Zea mays* L.): Experimentos e modelos.** Viçosa: UFV, 1998. 85p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

BERLATO, M.A., MATZENAUER, R., SUTILI, V.R. Relação entre temperatura e desenvolvimento do milho. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 23, REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO SORGO, 7, 1978, Porto Alegre. **Resumos...** Porto Alegre: IPAGRO, 1978. p. 19.

BLACKMAN, V.H. The compound interest law and plant growth. **Annals of Botany**, London, v. 33, p. 353-360, 1919.

CAMARGO, M. B. P. **Exigências bioclimáticas e estimativa da produtividade para quatro cultivares de soja no Estado de São Paulo.** Piracicaba: USP, 1984. 96p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", 1984.

CONFALONE, A. E. **Captura e utilização da radiação na cultura da soja (*Glycine max.* (L) Merrill) com e sem irrigação em diferentes estádios de desenvolvimento.** Viçosa: UFV, 1998. 74p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

- COSTA L.C., CONFALONE A., PEREIRA, C.R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, London, v. 39, n.1, p.1-7, 1999.
- COSTA, L. M. **Caracterização das propriedades físicas e químicas dos solos de terraço fluviais, na região de Viçosa, e sua interpretação para uso agrícola**. Viçosa: UFV, 1973. 55 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Solos) - Universidade Federal de Viçosa, 1973.
- DE WIT, C. T., BROUWER, R., PENNING DE VRIES, F.W.T. The simulation of photosynthetic systems. In: IBP/PP TECHNICAL MEETING, PREDICTION AND MEASUREMENTS OF PHOTOSYNTHETIC PRODUCTIVITY, 1969, Trebon. **Proceedings...** Trebon: 1970. p. 47-70.
- DOORENBOS, Y., KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 179p. (Series Irrigation and Drainage, 33).
- FERREIRA, W. P. M. **Desenvolvimento e teste de um modelo agrometeorológico de simulação para a cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill]**. Viçosa: UFV, 1998. 84p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- GAO, L., JIN, Z., HUANG, Y., demais autores. Rice clock model - a computer model to simulate rice development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 60, n. 1-2, p. 1-16, 1992.
- GILMORE JUNIOR, E. C., ROGERS, J.S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, p. 611-5, 1958.
- GOUDRIAAN, J., van LAAR, H. H. **Modelling potential crop growth processes**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994. 238p.
- GOUDRIAAN, J., MONTEITH, J.L. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. **Annals of Botany**, London, v. 66 p. 695-701, 1990.
- GOUDRIAAN, J. Using the expolinear growth equation to analyze resource capture. In: MONTEITH, J.L., SCOTT, R.K., UNSWORTH, M. H. (Eds.). **Resource capture by crops**. Nottingham: Nottingham University Press, 1994. p. 469.

- GREEN, C. F., HEBBLETHWAITE, P. D., ISON, D. A. A quantitative analysis of varietal and moisture status effects on the growth of *Vicia faba* in relation to radiation absorption. **Annals Applied Biology**, New York, v. 106, p. 143-155, 1985.
- GREGORY, F.G. Physiological conditions in cucumber houses. In: **Annual Report of the Experimental Research Station**. Cheshunt: 1918. p. 19-28.
- HAMMER, G. L., VANDERLIP, R.L. Genotype-by-environment interaction in grain sorghum. I. Effects of temperature on radiation use efficiency. **Crop Science**, New York, v. 29, p. 370-376, 1989.
- HUGHES, G., KEATINGE, J. D. H., COPPER, P. J. M., DEE, N. F. Solar radiation interception, and utilization by chickpea crops in northern Syria. **Journal of Agricultural Sciences**, Cambridge, v. 108, p. 419-424, 1987.
- HUNT, R. Plant growth analysis. The rationale behind the use of the fitted mathematical function. **Annals of Botany**, London, v. 43, p. 245-249, 1979.
- HUNT, R. **Plant growth curves**. The functional approach to plant growth analysis. New York: Edward Arnold, 1982, 248p.
- KINIRY, J. R., JONES, C. A. O', TOOLE, J. C, BLANCHET, R., CABELGUENNE, M., SPANEL, D. A. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain filling for five grain crop species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p.51-64, 1989.
- KLAMER, P.J., BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. London: Academic Press, 1995. 495p.
- KOLLER, H. R., NYQUIST, W. E., CHORUSH, I. S. Growth analysis of the soybean community. **Crop Science**, New York, v. 10, p. 407-412, 1970.
- LITTLETON, E.J., DENNETT, M.D., MONTEITH, J.L., ELSTON, J. The growth and development of cowpeas (*Vigna unguiculata*) under tropical field conditions. **Journal of Agricultural Sciences**, Cambridge, v. 93, p. 309-320, 1979.
- LIMA, M. G. **Calibração e validação do modelo CERES-Maize em condições tropicais do Brasil**. Piracicaba: USP, 1995. 119p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1995.

- LIU, W.T.H., BOTNER, D. M., SAKAMOTO, C. M. Application of CERES-Maize modelo to yield prediction of Brazilian maize hybrid. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 45, n. 3-4, p. 299-312, 1989.
- MASSIGNAM, A., ANGELOCCI, L.R. Determinação da temperatura-base e de graus-dia na estimativa da duração dos subperíodos de desenvolvimento de três cultivares de girassol. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n.1, p. 71-79, 1993.
- MELGES, E. **Crescimento, conservação da energia solar e nodulação da soja (*Glycine max.* (L) Merrill) sob quatro níveis de radiação solar, em Viçosa, Minas Gerais**. Viçosa: UFV, 1983. 78p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, 1983.
- MONSI, M., SAEKI, T. Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion. Japon. **Journal of Botany**, London, v. 14, p. 22-52, 1953.
- MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. B 281, p. 277-294, 1977.
- MONTEITH, J.L. Light and crop production. **Field Crop Abstracts**, v. 18, p. 213-219, 1965.
- NUÑEZ, J.G.O. **Caracterização das fases fenológicas de três cultivares de milho, utilizando o conceito de graus-dia**. Viçosa: UFV, 1986. p.54. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.
- ONG, C.K., MONTEITH, J.L. Response of pearl millet to light and temperature. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 11, p. 141-160, 1985.
- OWEN, P.C. The effects of temperature on the growth and development of rice. **Field Crop Abstracts**, Canberra, v. 24, n. 1, p. 1-8, 1971.
- PEREIRA, C. R. **Crescimento e desenvolvimento da cultura da soja (*Glycine max.* (L) Merrill) sob deficiência hídrica**. Viçosa: UFV, 1998. 98p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

- REYNOLDS, J.F., ACOCK, B. Predicting the response of plants to increasing carbon dioxide: a critique of plant growth models. **Ecolog. Model**, Amsterdam, v.29, p. 107-129, 1985.
- SALINAS, A. R., SANTOS, D.S.B., SANTOS FILHO, B.G., demais autores. Comportamento de genótipos de soja, haste el estado de plátulas, en diferentes niveles de humedad. In: **CONFERÊNCIA MUNDIAL DE INVESTIGACIÓN EN SOJA**, 4, 1989, Buenos Aires: Argentina. **Actas...** Buenos Aires: Associação Argentina de la Soja, 1989. p. 376-382.
- SEDIYAMA, T., PEREIRA, M. G., SEDIYAMA, C. S., GOMES, J. L. L. **Cultura da soja**. Parte I. Viçosa: UFV, 1993. p. 96. (Boletim, 211).
- SINCLAIR, T.R., HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: A Review. **Crop Science**, New York, v. 29, p. 90-98, 1989.
- SIONIT, N., KRAMER, P.J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.69, p. 214-278, 1977.
- STEER, B.T., MILROY, S.P., KAMONA, R.M. A model to simulate the development, growth and yield of irrigated sunflower. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 32, p. 83-99, 1993.
- STOCKLE, C. O., KINIRY, J.R. Variabilidade in crop radiation-use efficiency associated with vapour pressure deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 25, p. 171-181, 1990.
- TEI, F., AIKMAN, D.P, SCAIFE, A. Growth of lettuce, Onion, and Red Beet. 2. Growth Modelling, Light Interception, and Radiation Use Efficiency. **Annals of Botany**, London, v. 78, p. 645-652, 1996.
- WANG, J. Y. A critique of heat unit approach to plant response studies. **Ecology**, Brooklin, v.41, p. 785-790, 1960.