**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Adaptação do modelo LINTUL (Light Interception and Utilization) para
estimação da produtividade potencial da cultura de soja**

Simone Toni Ruiz Corrêa

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba
2008**

Simone Toni Ruiz Corrêa
Engenheiro Agrônomo

**Adaptação do modelo LINTUL (Light Interception and Utilization) para estimação da
produtividade potencial da cultura de soja**

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

**Dissertação apresentada para obtenção
do título de Mestre em Agronomia. Área
de concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba
2008**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Corrêa, Simone Toni Ruiz

Adaptação do modelo LINTUL (Light Interception and Utilization) para estimação da produtividade potencial da cultura de soja / Simone Toni Ruiz Corrêa. - - Piracicaba, 2008.
106 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Fenologia 2. Fotoperiodismo 3. Linguagem de programação 4. Produtividade 5. Soja
I. Título

CDD 633.34
C824a

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

In Balance with Nature

John Carew

In the beginning there was Earth, beautiful and wild;
 And then came man to dwell.
 At first, he lived like other animals
 Feeding himself on creatures and plants around him,
 And this was called IN BALANCE WITH NATURE.
 Soon man multiplied.
 He grew tired of ceaseless hunting for food;
 He built homes and villages,
 Wild plants and animals were domesticated.
 Some men became Farmers so that others might become
 Industrialists, Artists, Doctors, Lawyers or Bureaucrats
 And this was called Society.
 Man and Society progressed.
 With his God-given ingenuity, man learned to feed, clothe, protect,
 and transport himself more efficiently so he might enjoy Life.
 He built cars, houses on top of each other, and nylon.
 And life was more enjoyable.
 The men called Farmers became efficient.
 A single farmer grew food for 28 Industrialists, Artists and doctors
 And Writers, Engineers, and Teachers as well.
 To protect his crops and animals, the Farmer produced
 substances to repel or destroy Insects, Diseases and Weeds.
 These were called Pesticides.
 Similar substances were made by Doctors to protect humans.
 These were called Medicine.
 The Age of Science had arrived and with it came better diet and longer,
 happier lives for more members of Society.
 Soon it came to pass
 That certain well-fed members of Society disapproved of the Farmer using Science.
 They spoke harshly of his technique for feeding,
 protecting and preserving plants and animals.
 They deplored his upsetting the Balance of Nature;
 They longed for the Good Old Days.
 And this had emotional appeal to the rest of Society.
 By this time Farmers had become so efficient, society
 gave them a new title: Unimportant Minority.
 Because Society could not ever imagine a shortage of food
 Laws were passed abolishing Pesticides, Fertilizers, and Food Preservatives.
 Insects, Diseases, and Weeds flourished.
 Crops and animals died.
 Food became scarce.
 To survive, Lawyers, Bureaucrats, Industrialists, Artists
 and Doctors were forced to grow their own food.
 They were not very efficient.
 People and governments fought wars to gain more agricultural land.
 Millions of people were exterminated.
 The remaining few lived like animals,
 Feeding themselves on creatures and plants around them,
 And this was called IN BALANCE WITH NATURE.

*A memória de meu saudoso pai, **Ricardo Gustavo Ruiz**,
que nunca poupou esforços para minha formação,
a quem tudo devo e expresso meu eterno amor e gratidão.*

Dedico

Ofereço este trabalho a minha mãe, **Marilene Emília Toni Ruiz**, pela sua força, exemplo, amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conduzir com sabedoria o tempo de acontecimento das coisas (Ec.3.1-8).

Ao Professor Dr. Durval Dourado Neto, que despertou em mim a curiosidade científica e a busca pela perfeição, pelo exemplo profissional e pela amizade.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Departamento de Produção Vegetal e Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia) pela oportunidade de estudo.

Aos Professores Peter Leffelaar e Prem Bindraban, Universidade de Wageningen, por terem me recebido como ‘intercambista’, e pelas valiosas orientações e sugestões nesse trabalho.

Ao Professor Ricardo Ferraz de Oliveira, pelo companheirismo e disponibilização do espaço físico.

Ao Professor Gil Miguel de Souza Câmara, pelos conselhos e amizade.

Ao Pesquisador Sérgio Suzuki, Fundação MT, pelos auxílios prestados e dados fornecidos.

Ao Pesquisador da Embrapa Plínio Itamar de Mello de Souza, pelos relatórios disponibilizados.

Ao Sr. Antônio Francisco Iemma, que dedicadamente tanto me auxiliou com as análises estatísticas.

Ao Amigo Rafael Vivian, por todo apoio e carinho, dentro e fora do ambiente acadêmico.

Às minhas amigas Juliana Negrini e Thereza Rochelle, pelo incentivo, companheirismo e paciência com as minhas eventuais ausências.

À secretária do Programa do Pós-Graduação em Fitotecnia, Luciane Lopes, pelo excelente trabalho junto à secretaria de Pós-Graduação.

Ao meu irmão Eduardo Toni Ruiz, pela grandeza de seus atos no momento mais difícil de nossas vidas.

Ao meu marido, Alexandre Corrêa, que carinhosamente me incentivou, e pacientemente me apoiou na superação de cada obstáculo.

Aos meus tios, Roberto e Odette, que estiveram sempre ao meu lado, partilhando vitórias e derrotas ao longo do caminho.

Às minhas amigas, Cecília e Dna. Cida, pelo carinho sempre presente.

E por fim aos meus amados sobrinhos, Lucas e Larissa, cujos sorrisos me mostram a cada dia como viver vale a pena!!

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS	14
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Ecofisiologia da produção de soja	18
2.1.1 Crescimento e desenvolvimento	18
2.1.1.1 Germinação e emergência.....	19
2.1.1.2 Desenvolvimento vegetativo	19
2.1.1.3 Desenvolvimento reprodutivo	21
2.1.1.4 Análise de crescimento	23
2.1.2 Efeitos ambientais no desenvolvimento da planta	25
2.1.2.1 Temperatura	26
2.1.2.2 Radiação.....	27
2.1.2.3 Fotoperíodo	31
2.1.3 Adaptação da cultura de soja a baixas latitudes	33
2.2 Modelagem em agricultura	35
2.2.1 Componentes do processo de modelagem	37
2.3 Produtividade potencial.....	38
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	40
3.1 Descrição do modelo LINTUL	40
3.1.1 Desenvolvimento fenológico da cultura e efeitos ambientais.....	41
3.1.2 Crescimento e senescência foliar	44
3.1.3 Conversão da radiação solar em biomassa.....	46
3.1.4 Partição de biomassa	48

3.2	Parametrização do modelo LINTUL para a cultura de soja	50
3.2.1	Caracterização climática	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	Calibração do modelo LINTUL para a cultura de soja	54
4.1.1	Soma térmica.....	54
4.1.2	Área foliar específica e índice de área foliar inicial	54
4.1.3	IAF crítico para auto-sombreamento das folhas	55
4.1.4	Coeficientes de partição de biomassa	57
4.1.5	IAF, taxa relativa de crescimento e soma térmica durante a fase juvenil.....	58
4.1.6	Coeficiente de extinção luminosa.....	59
4.1.7	Eficiência no uso da radiação.....	60
4.2	Resultados da calibração do modelo LINTUL - soja	63
4.2.1	Desenvolvimento fenológico	63
4.2.2	Análise comparativa do índice de área foliar.....	66
4.3	Adequação do Modelo	70
4.4	Comparativo de resposta: LINTUL - soja (FST) e LINTUL -VB	75
4.5	Considerações finais	83
5	CONCLUSÕES	84
	REFERÊNCIAS.....	86
	ANEXOS	97

RESUMO

Adaptação do modelo LINTUL (Light Interception and Utilization) para estimação da produtividade potencial da cultura de soja

Em 2007 o complexo de soja foi responsável por 19 por cento do total das exportações do agronegócio brasileiro, gerando mais de U\$11 bilhões em divisas. Projeções indicam que até 2020 o Brasil deverá produzir 105 milhões de toneladas de soja, ou 81 por cento a mais do que a atual produção. Apesar de incidir sobre a produtividade a maior expectativa de crescimento, espera-se que a expansão significativa em área ocorra nas regiões de baixa latitude dos Cerrados, e em especial, no estado do Mato Grosso. É fundamental a determinação de estratégias que considerem produção, dimensões econômicas e ambientais. O uso da modelagem agrícola é a única forma de explorar sistematicamente o potencial produtivo em escala global e prever produtividades futuras em determinadas condições. A utilização de computadores e banco de dados torna-se uma ferramenta cada vez mais necessária, no sentido de disponibilizar rapidamente informações de qualidade a um custo relativamente inferior, quando em comparação a experimentos de campo. O modelo LINTUL, desenvolvido pela Universidade de Wageningen, foi extensamente utilizado para prever a produtividade potencial de culturas baseado no uso eficiente da radiação solar, sob condições ótimas de desenvolvimento. A cultura de soja, porém, nunca foi testada por este modelo. Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram: (i) adaptação, por intermédio da parametrização e da calibração do modelo LINTUL para estimação da produtividade potencial da cultura de soja; (ii) disponibilizar um algoritmo em Visual Basic (Microsoft), validando e replicando os procedimentos do LINTUL, tornando este modelo acessível a uma ampla gama de usuários. Para a parametrização do modelo, foram consideradas características específicas da cultura, como por exemplo, a sensibilidade ao fotoperíodo. Para calibração, foram usados dados de experimento de campo conduzido em Planaltina-DF e Sorriso-MT. Os parâmetros não avaliados no experimento foram extensivamente revisados com base na literatura. Os principais componentes do processo de crescimento e desenvolvimento da cultura foram analisados individualmente através de comparativos de respostas. Posteriormente, um estudo de adequação do modelo foi feito, com objetivo de viabilizar uma comparação de comportamentos, quando em diferentes situações. As variáveis climáticas usadas neste modelo foram temperatura máxima e mínima e radiação solar. A simulação dos estádios fenológicos é baseada na soma térmica. O modelo LINTUL-soja demonstrou excelente desempenho quanto à predição de tendências, com a variação dos valores dos parâmetros. Todavia, o modelo necessita de ajustes quanto a introdução de módulos, que contemplem o balanço de carboidratos. O uso de uma linguagem de programação aberta, como o Visual Basic, replicou a linguagem usada pelo modelo LINTUL com sucesso.

Palavras-chave: Modelo de crescimento de cultura; Radiação interceptada; Fotoperíodo; Linguagem de programação; Soma térmica

ABSTRACT

Adaptation of LINTUL model (Light Interception and Utilization) to estimate soybean potential production

In 2007 the soybean complex was responsible for more than 19% of the total Brazilian agribusiness exports, which corresponded to US\$ 11 billion generated in currencies. According to projections, soybean production in Brazil will increase significantly till 2020, reaching 105 million tons, or an addition of 81 percent to the current crop season. That huge difference is expected to come from a significant increase in yield, while the increase in acreage should come from the low-latitude regions of Cerrados, mainly in Mato Grosso state. Thus, it becomes extremely important to set out strategies that consider production, economic and environmental dimensions. The usage of agricultural modeling is the only mean of systematically exploring the production potential on global scale and predict future yield in certain conditions. Computers and database application becomes an implement even more efficient in respect of turn quickly and quality information available with lower costs, when compared to the field experiments. The LINTUL model was developed by the Wageningen University, and extensively used to predict crop potential production based on radiation use efficiency concept, under optimal conditions of growth. The soybean crop has never been tested by this model. The goals of this research are: (i) to adapt - through parameterizing and calibration - the LINTUL model to estimate the potential production of soybean; (ii) to provide an algorithm in Visual Basic language, in order to validate the calculations and replicate the procedures executed by LINTUL, making this model accessible to a wide range of users. In order to parameterize the model, crop-specific characteristics were taken into account, such as the sensibility of soybean to photoperiod. In respect to calibration, it was used field data collected in Planaltina-DF and Sorriso-MT. The mainly components of the growth and development process were analyzed based on response comparatives. Afterward, it was done a study of adequacy of the model, in order to enable a comparison of behaviors, when in different situations. The climatic variables used in this model were maximum and minimum temperature and solar radiation. The simulation of phenological stages was based on thermal unit concept. The LINTUL-soybean model has demonstrated an excellent performance to predict trends, with the change in the parameters values. However, the model needs to be adjusted in respect to an introduction module to calculate the carbohydrates balance into the canopy. The use of an open programming language, such as Visual Basic, replied the language used by LINTUL model successfully.

Keywords: Crop growth models; Intercepted radiation; Photoperiod; Program language; Thermal unit

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estádios de desenvolvimento da cultura de soja durante o período juvenil.....	20
Figura 2 –	Desenvolvimento sazonal da planta de soja.....	25
Figura 3 –	A) Relação entre o aumento no IAF e intensidade de luz calculada do topo para o interior do dossel, considerando: (a) $k=0.5$ e (b) $k=1$. Curva II, incluindo o coeficiente de reflexão da cultura $\rho_c=0.08$ (dia limpo), ilustra a contribuição das camadas de folhas individuais para a reflexão total do cultivo a (a) $k=0.5$ e (b) $k=1$. (II-I) Quantidade de luz absorvida pela cultura nos valores de k respectivos; B) Absorção, transmissão e reflexão de luz em uma folha.	30
Figura 4 –	Variação do fotoperíodo (em horas) em diferentes latitudes, e as respectivas datas de indução floral para planta de dias curtos (PDC)....	32
Figura 5 –	Grupos de maturação de cultivares de soja para diferentes latitudes no Brasil	34
Figura 6 –	Relação entre a taxa de desenvolvimento (TDF, d^{-1}) e a temperatura ($^{\circ}C$), para cálculo do acúmulo de graus-dia ($^{\circ}C.d$). Para: $T_{bi}=10^{\circ}C$; $T_{bs}=40^{\circ}C$; $T_{oi}=28^{\circ}C$ e $T_{os}=32^{\circ}C$	43
Figura 7 –	Platô linear para cálculo do efeito do fotoperíodo (em horas) na taxa de desenvolvimento da cultura (TDF, d^{-1}).....	44
Figura 8 –	Fluxograma do modelo LINTUL-soja.....	49
Figura 9 –	Evolução da temperatura média durante o ciclo da cultura, e temperaturas médias dos diferentes estádios fenológicos: da semeadura até a antese e da antese até a maturação ($^{\circ}C$) (Planaltina-DF, 1988-1989)	53
Figura 10 –	Índice de área foliar (IAF, $m^2.m^{-2}$) em função do número de dias após a emergência (DAE,d) – cultivar Savana	57
Figura 11 –	Evolução na escala de desenvolvimento fenológico (DF) da variedade cultivada Savana em função do acúmulo de graus-dia (GD, $^{\circ}C.d$), da emergência até a maturação, simulado pelo modelo LINTUL-soja.....	63
Figura 12 –	Taxa de alteração do desenvolvimento fenológico (TDF, d^{-1}) em função do tempo (t,dias Julianos), simulado pelo modelo LINTUL-soja.....	64

Figura 13 –	Fotoperíodo (FOTOP, horas) em função do tempo (t,dias Julianos), simulado pelo modelo LINTUL-soja.....	65
Figura 14 –	Índice de área foliar (IAF, $m^2(\text{folha}).m^{-2}(\text{solo})$) ao longo dos dias após a emergência (DAE,d), em função de diferentes valores de cr_{exp} ($^{\circ}C.d^{-1}$), assumindo como constantes os demais parâmetros ($EUR=1,8g.MJ^{-1}$; $IAF_{cr}=6(m^2(\text{folha}).m^{-2}(\text{solo}))$; $AFE=0,036(m^2.g^{-1})$; $k=0,7(m^2(\text{solo}).m^{-2}(\text{folha}))$)	66
Figura 15 –	Índice de área foliar (IAF, $m^2(\text{folha}).m^{-2}(\text{solo})$) ao longo dos dias após a emergência (DAE,d), em função de diferentes valores de AFE ($m^2.g^{-1}$), assumindo como constantes os demais parâmetros ($EUR=1,8g.MJ^{-1}$; $IAF_{cr}=6(m^2(\text{folha}).m^{-2}(\text{solo}))$; $k=0,7(m^2(\text{solo}).m^{-2}(\text{folha}))$; $cr_{exp}=0,010(^{\circ}C.d)^{-1}$) ...	67
Figura 16 –	Índice de área foliar (IAF, $m^2(\text{folha}).m^{-2}(\text{solo})$) ao longo dos dias após a emergência (DAE,d), em função de valores de $k=0,7$ ($m^2(\text{solo}).m^{-2}(\text{folha})$), assumindo como constantes os demais parâmetros ($EUR=1,8g.MJ^{-1}$; $IAF_{cr}=6(m^2(\text{folha}).m^{-2}(\text{solo}))$; $AFE=0,036(m^2.g^{-1})$; $cr_{exp}=0,010(^{\circ}C.d)^{-1}$)	68
Figura 17 –	Índice de área foliar (IAF, $m^2(\text{folha}).m^{-2}(\text{solo})$) ao longo dos dias após a emergência (DAE, d), em função de diferentes valores de EUR ($g.MJ^{-1}$), assumindo como constantes os demais parâmetros ($AFE=0,036(m^2.g^{-1})$; $IAF_{cr}=6(m^2(\text{folha}).m^{-2}(\text{solo}))$; $k=0,7(m^2(\text{solo}).m^{-2}(\text{folha}))$; $cr_{exp}=0,010(^{\circ}C.d)^{-1}$) ...	70
Figura 18 –	Simulação do acúmulo de graus-dia (GD, $^{\circ}C.d$) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)	76
Figura 19 –	Simulação do desenvolvimento fenológico (DF) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)	76
Figura 20 –	Simulação do índice de área foliar (IAF, $m^2(\text{folha}).m^{-2}(\text{solo})$) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST).....	77
Figura 21 –	Simulação da taxa de acúmulo de massa de matéria seca total (TAMS, $g.m^{-2}.d^{-1}$) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)....	77

- Figura 22 – Simulação da taxa de senescência foliar ($TSF, g.m^{-2}.d^{-1}$) (A) e da taxa relativa de mortalidade das folhas (TRM, d^{-1}) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)..... 78
- Figura 23 – Simulação do acúmulo de massa de matéria seca das folhas verdes ($MSfv, g.m^{-2}$) (A) e das folhas secas ($MSfs, g.m^{-2}$) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)..... 79
- Figura 24 – Simulação da taxa de acúmulo de massa de matéria seca das raízes ($TMSr, g.m^{-2}.d^{-1}$) (A) e do acúmulo de massa de matéria seca das raízes ($MSr, g.m^{-2}$) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST).... 80
- Figura 25 – Simulação da taxa de acúmulo de massa de matéria seca das hastes ($TMSh, g.m^{-2}.d^{-1}$) (A) e do acúmulo de massa de matéria seca das hastes ($MSh, g.m^{-2}$) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST).... 81
- Figura 26 – Simulação da taxa de acúmulo de massa de matéria seca nos grãos ($TMSg, g.m^{-2}.d^{-1}$) (A) e do acúmulo de massa de matéria seca nos grãos ($MSG, g.m^{-2}$) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST).... 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Parâmetros do modelo LINTUL referentes à cultura de soja	51
Tabela 2 –	Área Foliar Específica (AFE, $m^2.g^{-1}$) da variedade Savana durante o crescimento vegetativo.....	55
Tabela 3 –	Fração de matéria seca alocada nas diferentes estruturas da planta em função do estágio de desenvolvimento (ED)	58
Tabela 4 –	Duração (d) do período e suas variações entre os estádios inicial e final de desenvolvimento da cultivar de soja segundo a classificação de Fehr e Caviness (1977).....	59
Tabela 5 –	Coeficiente de extinção luminosa k ($m^2(solo).m^{-2}(folha)$) obtidos na literatura	60
Tabela 6 –	Eficiência no uso da radiação (EUR, $g.MJ^{-1}$) obtidos na literatura.....	62
Tabela 7 –	Variedades cultivadas e respectivas datas de semeadura, antese e maturação, com correspondentes valores de soma térmica, em °C.d; grupo de maturação e produtividade observada ($kg.ha^{-1}$) em Sorriso-MT, ano safra 2007-2008.....	71
Tabela 8 –	Resumo dos valores das matrizes de similaridade por variedade cultivada de soja..	72
Tabela 9 –	Menores diferenças entre produtividade ajustadas via modelo e produtividade observada a campo	72
Tabela 10 –	Resultado das regressões lineares entre a variedade Linha 6-62.435/2 e as demais variedades cultivadas.	73
Tabela 11 –	Teste de heterogeneidade das inclinações.....	74
Tabela 12 –	Teste de heterogeneidade dos interceptos.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviação	Unidade	Descrição
GDEM	°C.d	Soma térmica da semeadura até a emergência
GDJU	°C.d	Soma térmica durante a fase juvenil
GD1	°C.d	Soma térmica entre a emergência e antese
GD2	°C.d	Soma térmica a antese e maturação
TGDE	°C	Acúmulo de graus-dias entre a semeadura e emergência
TGD	°C	Acúmulo de graus-dias entre emergência e fase juvenil
TGDJ	°C	Acúmulo de graus-dias após fase juvenil
IAFi	m ² (folha).m ⁻² (solo)	Área foliar inicial (emergência)
IAFju	m ² .m ⁻²	IAF no final da fase juvenil
AFE	m ² .g ⁻¹	Área foliar específica
cr exp	(°C.d) ⁻¹	Taxa de crescimento relativo do IAF durante a fase juvenil
CPR	-	Coeficiente de partição de fotoassimilados para as raízes
CPF	-	Coeficiente de partição de fotoassimilados para as folhas
CPH	-	Coeficiente de partição de fotoassimilados para as hastes
CPG	-	Coeficiente de partição de fotoassimilados para os grãos
IAFcr	m ² (folha).m ⁻² (solo)	Índice de área foliar crítico em função do sombreamento
K	m ² (solo).m ⁻² (folha)	Coeficiente de extinção luminosa
EUR	g.MJ ⁻¹	Eficiência no uso da radiação
Qg	MJ.m ⁻² .d ⁻¹	Radiação solar
TEF	°C	Temperatura efetiva
Tbi	°C	Temperatura basal inferior
Tbs	°C	Temperatura basal superior
Toi	°C	Temperatura ótima inferior
Tos	°C	Temperatura ótima superior
TDF	d ⁻¹	Taxa de alteração no desenvolvimento
DF	-	Desenvolvimento fenológico
IAF	m ² .m ⁻²	Índice de área foliar
TRM	d ⁻¹	Taxa relativa de mortalidade das folhas
TME, TMS	d ⁻¹	Taxa de mortalidade relativa devido ao envelhecimento e sombreamento
TSF	g.m ⁻² .d ⁻¹	Taxa de senescência foliar
RFAint	MJ.m ⁻² .d ⁻¹	Radiação fotossinteticamente ativa interceptada
TAMS	g.m ⁻² .d ⁻¹	Taxa de acúmulo de massa de matéria seca total
FRZ	-	Fração de massa de matéria seca alocada para as raízes
FFO	-	Fração de massa de matéria seca alocada para as folhas
FHA	-	Fração de massa de matéria seca alocada para as hastes
FGR	-	Fração de massa de matéria seca alocada para os grãos
MSr	g.m ⁻²	Massa de matéria seca das raízes
MSfv, MSfs	g.m ⁻²	Massa de matéria seca das folhas verdes secas
MSh	g.m ⁻²	Massa de matéria seca das hastes
MSg	g.m ⁻²	Massa de matéria seca dos grãos
TMf	g.m ⁻² .d ⁻¹	Taxa de acúmulo da massa de matéria seca das folhas
TMSr	g.m ⁻² .d ⁻¹	Taxa de acúmulo de massa de matéria seca nas raízes
TMSg	g.m ⁻² .d ⁻¹	Taxa de acúmulo de massa de matéria seca nos grãos
TMSH	g.m ⁻² .d ⁻¹	Taxa de acúmulo de massa de matéria seca nas hastes

1 INTRODUÇÃO

A produção brasileira de grãos de soja [*Glycine max* (L.) Merr.] mais do que dobrou na última década, subindo de 26,4 milhões de toneladas em 1997 para 58 milhões de toneladas em 2007. No mesmo período, a área plantada aumentou 79 por cento, passando de 11,5 milhões de hectares em 1997 para 20,6 milhões de hectares em 2007, enquanto a produtividade incrementou 23 por cento, de 2.297 kg.ha⁻¹ para 2.815 kg.ha⁻¹ (IBGE, 2008). Em 2007, as exportações do agronegócio brasileiro registraram superávit recorde de US\$ 58.4 bilhões, sendo o complexo de soja - líder no ranking dos produtos do agronegócio exportados - responsável por mais de US\$ 11 bilhões gerados em divisas (BRASIL, 2008).

Esta notável expansão foi fortemente induzida pela demanda externa. A combinação de preços atrativos para exportação, oferta de financiamentos agrícolas público e privado, pronta disponibilidade de vastas extensões de terras aráveis e baratas, e a perspectiva de produção em larga escala resultou em um crescimento explosivo do cultivo comercial de soja pelo Brasil. Originalmente cultivada na região Sul do país, foi a partir da década de 80 que tradicionais produtores deste grão realocaram recursos em regiões de baixa latitude do Centro-Oeste, cuja expansão em área ocorreu tanto pela conversão de pastos já existentes, quanto pela abertura de áreas virgens de Cerrado. No tocante a produção, dada a sensibilidade da cultura de soja ao fotoperíodo, seu cultivo nestas regiões somente teve sucesso mediante hibridações para a transferência de genes, que condicionam período juvenil longo. Como consequência, a soja selecionada nestas regiões apresenta características agrônômicas e produtividade desejáveis (KIIHL; GARCIA, 1989).

O bioma Cerrado é uma vasta área de aproximadamente 204 milhões de hectares que se estende por 11 estados (IBGE, 2004), caracterizado por solos topograficamente favoráveis, mas pobres em fertilidade. Mosaico de pastagens naturais, savanas e florestas tropicais perenes, o bioma Cerrado é identificado como um dos maiores centros de biodiversidade do mundo. O maior estado deste bioma, o Mato Grosso, é também o principal produtor brasileiro de soja, responsável por aproximadamente 30 por cento da produção nacional (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2008), e provavelmente o estado onde a maior parte do crescimento esperado da produção de soja deverá ocorrer.

A demanda de soja nos mercados mundiais deve aumentar ainda mais as projeções de produção vigentes. Os principais fatores que corroboram para isso são: crescente demanda nos

mercados emergentes, particularmente China e Índia, que pressionam os preços desta commodity; incentivos para o aumento na produção de biocombustíveis, como um suplemento aos combustíveis para o transporte; e a combinação destes fatores: a maior demanda de biocombustíveis, principalmente nos Estados Unidos e União Européia, não só eleva os preços do milho e soja, como também resulta em altas de preço das culturas de substituição, aumentando o custo de produção e incentivando os produtores a migrarem destas culturas para fontes mais energéticas.

Baseado nesse cenário, a Associação Brasileira das Indústrias de Óleo Vegetal (ABIOVE, 2007) estimou que a produção de grãos de soja aumentará significativamente até 2020, alcançando 105 milhões de toneladas, ou 81 por cento a mais comparada à safra atual. Espera-se que esta enorme diferença venha do aumento significativo na produtividade, na ordem de 2 por cento ao ano, enquanto o aumento em área deverá atingir 8 milhões de hectares. Uma porção significativa desse crescimento e expansão virá do Mato Grosso – também considerado um dos estados líderes no ranking de desmatamento florestal (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, 2008). Dessa maneira, torna-se extremamente importante a determinação de estratégias que considerem produção, dimensões econômicas e ambientais, ou seja, que priorizem a ‘sustentabilidade’.

O uso da modelagem agrícola é a única forma de explorar sistematicamente o potencial produtivo em escala global e prever produtividades futuras em determinadas condições. A partir da utilização desta técnica, torna-se possível a criação de cenários por intermédio de simulações, que utilizam um conjunto de equações que irão representar um processo. A abordagem é necessariamente simples; as estimativas quantitativas não devem ser consideradas como as respostas finais, mas sim uma referência para análises de possibilidades e restrições, que só podem ser obtidos por trabalhos de campo (PENNING DE VRIES et al., 1989).

A utilização de computadores e banco de dados torna-se uma ferramenta cada vez mais eficiente no sentido de disponibilizar informações de qualidade em um curto período, a um custo muito menor em comparação a instalação de experimentos a campo, que podem ser realizados com a finalidade de calibrar o modelo. A informática pode minimizar problemas referentes a diferentes ambientes entre os locais de produção. Dessa forma, a simulação de processos assume papel fundamental para pesquisas e gerenciamento global do cultivo de uma determinada cultura em um determinado lugar.

O modelo LINTUL (Light INTerception and UtiLization - Interceptação e Utilização da Luz em português), foi desenvolvido nos anos 90 pela Universidade de Wageningen, Holanda, para prever a acumulação de matéria seca baseado no uso eficiente da radiação solar, em condições potenciais ótimas de desenvolvimento. Apesar de inicialmente parametrizado para a cultura da batata, adaptações têm sido feitas nas últimas décadas para sua utilização em diversas culturas. A cultura de soja nunca foi testada.

O modelo usa o Tradutor de linguagem de programação para Simulação FORTRAN (FST, sigla em inglês – TSF em português), inicialmente delineado na década de 50, e o programa correspondente FST para Windows (FSTWin), atualizado em 2001. Esta linguagem de programação, apesar de bastante útil e difundida na Europa, é pouco conhecida em países onde a modelagem agrícola ainda não está totalmente estabelecida, como no Brasil.

Os objetivos deste trabalho são: (i) adaptação, por intermédio da parametrização (definição de parâmetros) e da calibração (definição da ordem de grandeza e adequação destes parâmetros) do modelo LINTUL, para estimação da produtividade potencial da cultura de soja; (ii) disponibilizar um algoritmo em Visual Basic (Microsoft), validando e replicando os procedimentos do LINTUL, tornando este modelo acessível a uma ampla gama de usuários.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ecofisiologia da produção de soja

2.1.1 Crescimento e desenvolvimento

O crescimento, desenvolvimento e o rendimento de determinada cultura são resultados da interação entre o potencial genético de uma variedade, ambiente e práticas de manejo da lavoura (nutrientes, solo, pragas, doenças e plantas daninhas) (McWILLIAMS et al., 1999). Entender como o crescimento e desenvolvimento da planta interagem com fatores ambientais é extremamente importante para potencializar a produtividade das culturas; por exemplo, através de programas de melhoramento genético ou estabelecendo estratégias de gerenciamento, visando identificar estádios de crescimento nos quais a produtividade potencial pode ser afetada (PEDERSEN, 2007).

O crescimento da cultura é medido pela quantidade de matéria seca acumulada na planta. Com exceção da água, a massa de matéria seca consiste em tudo que se encontra na planta, incluindo carboidratos, proteínas, lipídeos e nutrientes minerais. As sementes de soja possuem grande quantidade de proteínas (40%), além de carboidratos (34%) e óleos (19%) (SBARDELOTTO; LEANDRO, 2008).

A caracterização dos estádios de desenvolvimento da cultura de soja é de grande importância para padronizar critérios, ou parâmetros de avaliação de resultados, em diferentes experimentos ou pesquisas. Uma das escalas mais conhecidas e adotadas para a cultura de soja é a proposta por Fehr e Caviness (1977). Neste sistema, a soja apresenta dois principais estádios de desenvolvimento: vegetativo (estádio V) e reprodutivo (estádio R). O estágio vegetativo é determinado pela contagem do número de nós na haste principal, começando pelo par de folhas unifoliadas. Inicia-se na emergência da plântula, e termina com a abertura da primeira flor. O estágio reprodutivo inicia-se com a abertura da primeira flor, terminando com a maturação de colheita. Como os estádios podem se sobrepor, um estágio de crescimento apenas é considerado quando 50% ou mais das plantas encontram-se no mesmo período em questão, ou além deste estágio.

2.1.1.1 Germinação e emergência

A semente de soja é formada por três partes primárias, o embrião, de onde se desenvolverá a nova planta; os cotilédones, que proverão a fonte de energia para a germinação, emergência e desenvolvimento inicial da semente, e o tegumento, que protege tanto o cotilédone quanto o embrião contra doenças, insetos e lesões.

Quando a semente de soja absorve 50% de seu peso em umidade, a germinação se inicia. A radícula, ou raiz primária, prolonga-se para baixo dentro de 1 a 2 dias após a semeadura (CÂMARA, 1998), desenvolvendo ramificações após atingir 2-3 cm de comprimento (HICKS, 1978), isto é, de 4 a 5 dias após a semeadura (CÂMARA, 1992). Logo após o crescimento da radícula, o hipocótilo (pequena seção do caule situada entre o nó cotiledonar e a raiz primária) começa a se alongar para a superfície do solo, arrastando consigo os cotilédones. A emergência dos cotilédones (estádio VE) normalmente ocorre dentro de 5 a 7 dias após a semeadura, sob condições ambientais ideais (CÂMARA, 2006). O tempo transcorrido entre semeadura e emergência depende da temperatura e umidade do solo, sistema e profundidade de semeadura (ALVAREZ FILHO, 1998).

2.1.1.2 Desenvolvimento vegetativo

Logo após a emergência, o hipocótilo em forma de gancho endireita-se e cessa seu crescimento, enquanto os cotilédones dobram-se para baixo. Os cotilédones funcionam como uma reserva energética até que a planta se torne completamente autotrófica, ou seja, 10-15 dias após a emergência. Eles se tornam amarelos e se soltam da planta ainda durante o início do desenvolvimento vegetativo (CÂMARA, 2006).

A planta de soja madura tem 19-24 nós que estão completamente diferenciados em 4-5 semanas após a semeadura (JOHNSON et al., 1960). O primeiro nó inferior é o ponto de fixação dos cotilédones, e o nó subseguinte origina a folha unifoliada, ou primária. Todos os nós subseqüentes produzem, caule acima, folhas trifoliadas únicas e alternadas (HICKS, 1978).

O estágio VC é considerado quando a folha cotiledonar está aberta e a folha unifoliada expandida. Seguindo o estágio VC, todos os outros estádios vegetativos são enumerados de acordo com o número de nós no eixo principal (Vn) com uma folha completamente desenvolvida (BEAN; MILLER, 1998), e que possui uma folha acima dele que tenha acabado de se desenrolar. Portanto, o estágio V1 é atingido quando as primeiras folhas unifoliadas estão completamente

desenvolvidas e a folha no nó acima delas está acabando de se expandir. Os folíolos vão de oblongos a ovalados em forma e possuem bordas interiças.

O período entre a emergência e V1 é chamado de juvenil ou pré-indutivo, devido as plantas ainda não estarem aptas a responder ao fotoperíodo (WILKERSON et al., 1989; GRIMM et al., 1994; CÂMARA, 1998; RODRIGUES et al., 2001). Durante este período, a temperatura é o fator predominante e o crescimento é exponencial no tempo.

A fase seguinte – a indutiva – é modulada pela temperatura e fotoperíodo. Deste momento em diante, a planta está apta a responder às mudanças induzidas por estímulos no meristema, de vegetativa para reprodutiva. A área de expansão da folha é então restrita por suprimentos assimilados.

Figura 1 – Estádios de desenvolvimento da cultura de soja durante o período juvenil

Estádio VE – emergência dos cotilédones; VC – cotilédones desenvolvidos e folhas unifoliadas expandidas; V1 – folhas unifoliadas completamente desenvolvidas e folhas trifoliadas superiores desenroladas.

Fonte: Modificado de Universidade de Michigan (2000)

2.1.1.3 Desenvolvimento reprodutivo

Os estádios reprodutivos (estádios R) estão divididos em quatro partes: R1 e R2 descrevem o florescimento; R3 e R4 o desenvolvimento da vagem; R5 e R6 o desenvolvimento da semente e R7 e R8 representam a maturação da planta. Os primórdios florais são iniciados dentro de 3 semanas, e a floração começa dentro de 6 a 9 semanas após a emergência, quando cultivados em uma área de adaptação.

Quando uma flor aberta é visível em qualquer nó na haste principal, inicia-se o estágio R1. O florescimento começa na haste principal, em geral, entre o terceiro e o sexto nó, progredindo para cima e para baixo. As taxas de crescimento da raiz aumentam e a floração plena é atingida no estágio R2, que corresponde a 50% da altura final e 25% da massa de matéria seca final da planta (OMAFRA, 2002). Nesse período, o sistema radicular apresenta-se completamente desenvolvido no espaço entre linhas de 102 cm, com várias raízes laterais, direcionando o seu crescimento para baixo. Essas raízes, junto com a principal, continuam se aprofundando no perfil do solo até logo após o estágio R6.

A soja é normalmente auto-polinizada. As flores abrem-se no começo da manhã e o pólen é liberado pouco antes ou no momento da abertura das flores, diretamente sobre o estigma. Como as flores também são visitadas por insetos, pode haver polinização cruzada, mas esta forma é considerada normalmente menor do que 1%. Após a fertilização, o desenvolvimento da semente é rápido. Em aproximadamente 65-75 dias as sementes estão fisiologicamente maduras, contendo cerca de 55% em umidade nesta etapa (HICKS, 1978).

Vagens são visíveis entre 10 dias a 2 semanas após o estabelecimento da floração, que continua ainda por 3 a 4 semanas; muitos estádios do desenvolvimento da vagem e da semente ocorrem na planta até próximo de sua maturidade fisiológica. Na fase inicial de formação das vagens (R3), pequenas cápsulas podem ser vistas em nós mais altos da haste principal, com folhas totalmente desenvolvidas. Condições de estresse que causam altas taxas de aborto entre R1 e R3, geralmente não reduzem significativamente o rendimento, pois algumas flores ainda podem ser produzidas até o estágio R5. Além disso, o estresse nesses estádios pode resultar em um aumento no número de sementes por vagem e no peso por semente, que também ajuda a compensar o abortamento das flores e das vagens jovens.

O estágio R4 marca o início do período mais crítico de desenvolvimento da planta quanto à determinação do rendimento em sementes. O estresse nessa fase não pode ser recuperado e resulta em uma maior perda de produtividade que em qualquer outro momento (CÂMARA, 1998).

A fase seguinte (R5) corresponde ao começo da formação da semente. Neste período há significativa translocação de nutrientes das partes vegetativas para as sementes em formação, enquanto a fixação de nitrogênio atinge seu máximo, caindo rapidamente logo em seguida. Neste momento a floração está completa, exceto por alguns ramos, e a planta atingiu altura, nós e área foliar máximos. R6 se dá quando as sementes dentro das vagens se caracterizam por apresentar largura igual à da cavidade da vagem, porém, sementes de todos os tamanhos podem ser observadas na planta nesse momento. Nesse estágio, o valor da massa de matéria seca total das vagens é máximo, enquanto o crescimento da raiz diminui substancialmente e um rápido amarelamento das folhas se inicia.

R7 - também chamado de início da maturidade fisiológica - é considerado o ponto no qual uma vagem normal da haste principal atinge sua cor de maturação (marrom). Nesta fase, as sementes têm aproximadamente 50%-60% de umidade e contém todas as partes necessárias para começar sua próxima geração (HOWELL et al., 1959). A maturidade fisiológica ocorre quando a semente atinge o máximo valor em massa de matéria seca. Quando 95% das vagens mudam para a coloração marrom, a soja atinge a maturidade completa (R8). Neste momento, a semente de soja deve possuir um nível de umidade menor do que 15% (LACERDA, 2007).

As plantas de soja apresentam diversidade quanto ao hábito de crescimento da haste principal e de floração. Basicamente, as variedades podem ser classificadas em três tipos: indeterminado, determinado e semi-determinado (BERNARD, 1972). Cultivares indeterminados continuam o crescimento vegetativo após início da floração, e não apresentam ráculos terminais na haste principal. Geralmente florescem sequencialmente para cima na haste central, podendo apresentar vagens bem desenvolvidas em nós mais baixos, com flores recentemente desenvolvidas em nós superiores. Tipos determinados praticamente cessam o crescimento vegetativo logo após R1, e apresentam florescimento uniforme em todos os nós da haste principal. Cultivares com hábito de crescimento semi-determinado, a semelhança dos indeterminados, o florescimento tem início quando aproximadamente metade dos nós da haste principal já se formou, mas o florescimento e o desenvolvimento de novos nós terminam mais abruptamente do que nos tipos indeterminados (SEDIYAMA et al., 1999). O crescimento vegetativo após a floração e

estabelecimento das vagens ocorre, na maior parte, em ramos nos tipos determinados e na haste principal nos indeterminados (EGLI et al., 1985).

2.1.1.4 Análise de crescimento

Crescimento pode ser definido como o aumento irreversível no tamanho e massa de matéria seca de uma planta ou comunidade vegetal (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994). Vários índices são deduzidos e utilizados na tentativa de descrever e explicar o comportamento de determinadas espécies vegetais, acompanhar seu desenvolvimento e a contribuição dos diferentes órgãos no crescimento total, permitindo conhecer o seu funcionamento e de suas estruturas (BENINCASA, 1988). Uma técnica conhecida como ‘Análise de Crescimento’ tem sido bastante utilizada com o objetivo primordial de gerar descrições claras do padrão de crescimento da planta ou de partes dela, permitindo comparações entre situações distintas, podendo ser aplicada às mais diversas modalidades de estudos. Nesta técnica, determinados cálculos são feitos com base na acumulação de matéria seca e no índice de área foliar para uma comunidade de plantas durante o período de crescimento.

O acúmulo de biomassa da cultura de soja ao longo do tempo segue uma curva de crescimento sigmóide (LOOMIS; CONNOR, 1992). A inclinação dessa curva é chamada taxa de crescimento absoluto da cultura (TCA, $\text{g.m}^{-2}(\text{área de solo}).\text{d}^{-1}$), que é definida como o aumento de biomassa por unidade de tempo (RADFORD, 1967). Em outras palavras, TCA integrada ao longo do período de crescimento resulta na produção da cultura, e é em função da taxa de assimilação líquida (TAL, $\text{g.m}^{-2}(\text{área foliar}).\text{dia}^{-1}$) - que fornece a influência das folhas na produção de novos materiais – e do índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2(\text{planta}). \text{m}^{-2}(\text{solo})$). A TCA na soja aumenta durante os primeiros 50-60 dias após a semeadura, diminuindo significativamente após este período (BUTTERY, 1970). TAL é alta na fase de crescimento inicial, diminuindo à medida que as folhas crescem; TAL e IAF apresentam correlação negativa durante certo período.

Contudo, o uso da TCA é uma maneira equivocada de expressar o crescimento de determinada comunidade vegetal em função do tempo, podendo haver variações, por exemplo, quanto a quantidade de luz interceptada pela cultura em função de diferentes tipos de radiação incidente. Sendo assim, a variável taxa de crescimento relativo (SINCLAIR; MUCHOW, 1999). TCR ($\text{g.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$), também chamado de ‘índice de eficiência’, determina a quantidade de material vegetal produzido (g) por determinada quantidade de material existente (g), durante um intervalo

de tempo prefixado (d) (OLIVEIRA; GOMIDE, 1986 apud GUIMARÃES, 1994). A TCR de cada fração vegetal individual aumenta, em uma taxa decrescente, conforme o período avança.

A curva sigmóide do crescimento da cultura de soja pode ser dividida em três fases: um período juvenil inicial, cujo crescimento é exponencial no tempo; um grande crescimento linear e uma fase de senescência (LOOMIS; CONNOR, 1992).

Durante a fase juvenil (da emergência até o estágio V1), a temperatura é o fator dominante que influencia o desenvolvimento da cultura de soja. A massa de matéria seca individual das plantas aumenta em uma proporção diária constante, levando a um crescimento exponencial (HEEMST, 1986). Cada nova folha formada contribui para uma maior quantidade de luz interceptada, aumentando ainda mais o crescimento. Ainda não há sombreamento mútuo e a contribuição da nova folha é idêntica à das folhas já existentes. O crescimento exponencial apenas ocorre quando a cobertura do solo ainda é pequena, a grosso modo, este é o caso de uma biomassa abaixo de 100 g.m^{-2} . A taxa relativa de crescimento - fortemente dependente da temperatura, radiação e variedade - é então constante. (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994).

Com o tempo, conforme a área foliar aumenta, a interceptação da luz e a fotossíntese também aumentam, assim como a TCA. Este aumento na TCA continua até o fechamento completo do dossel. Neste momento, as folhas começam gradualmente a sombrear umas às outras, e acima de um determinado IAF, novas áreas foliares dificilmente resultam em algum aumento na quantidade de luz interceptada. Na soja, a taxa de produção de matéria seca aumenta até IAF de 3,9-5,0 (SHIBLES; WERBER, 1965), porém, não diminui a maiores valores do mesmo (HICKS et al., 1969, 1978). Estes valores geralmente correspondem a 95% ou mais da interceptação de luz, ou valor 'crítico' de IAF, que eleva a produção de matéria seca ao seu máximo. Pode haver variação devido às condições ambientais e culturais (JEFFERS; SHIBLES, 1969), e como um alto valor de IAF não contribui adicionalmente para a produção de biomassa, o crescimento permanece linear.

Figura 2 – Desenvolvimento sazonal da planta de soja

A fase de senescência é caracterizada pela abscisão das folhas e declínio da TCA. Com o declínio no IAF, há evidências de que a translocação de nutrientes das folhas e da haste para os órgãos de armazenamento já começou. Enquanto o IAF permanece elevado, pouco efeito na taxa de crescimento será notado. Conseqüentemente, uma maior duração da área foliar desempenha um papel importante no aumento de produtividade.

Com um suprimento ótimo de água e nutrientes e ausência de ervas daninhas, pragas e doenças, a taxa de crescimento é determinada pela radiação solar e temperatura e entende-se por taxa de crescimento potencial (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994).

2.1.2 Efeitos ambientais no desenvolvimento da planta

Diversas condições ambientais determinam o ciclo das culturas. Segundo Pascale (1969), para que a cultura de soja prospere em determinada região, é necessário o atendimento de suas exigências térmicas, de radiação, hídricas e fotoperiódicas. O comprimento do dia, a temperatura

e a chuva são os elementos do clima mais importantes para a seleção de regiões para o cultivo e a produção de soja (CÂMARA, 1991).

Em condições hídricas ótimas, e na ausência de pragas e doenças, a temperatura e fotoperíodo podem ser usados para simular a fenologia da cultura de soja, por servirem como substitutos para complexas vias bioquímicas, levando ao aparecimento de certos estádios de desenvolvimento no vegetal como um todo (SETIYONO et al., 2007).

2.1.2.1 Temperatura

Temperatura é uma das variáveis mais importantes que afetam não apenas o acúmulo de biomassa, mas também a duração dos diferentes estádios de desenvolvimento, pois a planta requer certa quantidade de unidades térmicas para alcançar a próxima fase do desenvolvimento (SCHOFFEL; VOLPE, 2002). Esse conceito, também definido como graus-dia (GD, °C.d), é a diferença entre a temperatura média diária e a temperatura basal exigida por uma espécie (VILLA NOVA et al., 1972). A temperatura geralmente tem uma influência positiva na taxa de desenvolvimento da cultura (SETIYONO et al., 2007), mas esta taxa pode também diminuir sob excessivos valores (HESKETH et al., 1973, MEYERS et al., 1991a).

A temperatura basal varia conforme a espécie vegetal, idade ou estágio fenológico da planta. Torna-se comum a adoção de uma mesma temperatura basal para uma determinada cultura durante todo o ciclo da planta, devido à facilidade de aplicação (CAMARGO, 1984). Para a cultura de soja, é considerada a temperatura basal de 10°C. A temperatura influencia significativamente o tempo para que ocorra o florescimento em ambientes com fotoperíodo constante (baixas latitudes) (GARNER; ALLARD, 1930).

O crescimento e desenvolvimento da cultura de soja são otimizados quando a temperatura varia entre 20 - 30°C (HOFSTRA, 1972; HESKETH et al., 1973) - temperatura média durante o período de crescimento na maior parte das áreas tropicais do Cerrado (Savana brasileira). A maior fração de germinação de soja no menor tempo ocorre sob temperatura constante de 30°C. Stucky (1976) estudou o efeito da profundidade de semeadura e temperatura na emergência, e concluiu que altas temperaturas (32°C) aceleraram a emergência com alguma redução na porcentagem das mesmas. Temperaturas acima de 40°C inibem a germinação das sementes, enquanto temperaturas abaixo de 10°C reduzem consideravelmente a taxa de alongação do hipocótilo (WHIGHAM;

MINOR, 1978), diminuindo a taxa de desenvolvimento da cultura de soja próximo de zero (BROWN, 1960; DOORENBOS; KASSAM, 1979).

O desenvolvimento foliar também está relacionado à temperatura; a área da folha aumenta dentro da faixa de 18 - 30°C (Hicks, 1978). Muitos autores (THOMAS; RAPER, 1978; SHIBLES et al., 1975; GRIMM et al., 1993; MAYERS et al., 1991b) mencionam que a taxa de preenchimento da vagem pela semente é aumentado por temperaturas ao redor de 24 - 30°C. A faixa de temperatura ótima do ar para assimilação de CO₂ é de 25°C a 30°C (JEFFERS; SHIBLES, 1969), enquanto a fixação de nitrogênio é beneficiada por temperaturas ao redor de 27 - 32°C (CÂMARA, 1998).

Temperaturas ambientais adversas podem impedir a produção, translocação ou utilização de alguns estímulos, por exemplo, a indução floral, que é altamente inibida por temperaturas abaixo de 13°C (EMBRAPA, 2008). Temperaturas acima de 40°C têm efeito adverso na taxa de formação do nós e iniciação floral. O estresse pelo calor entre 40 - 46°C resulta na abscisão da vagem (WHIGHAM; MINOR, 1978).

2.1.2.2 Radiação

O aumento da produção de alimentos relaciona-se diretamente com a maximização da utilização dos recursos naturais. Dentre esse, a radiação solar constitui-se uma fonte energética básica. Monteith (1994) indica que a produção de matéria seca pode ser expressa das seguintes formas: (i) recurso disponível por unidade de solo; (ii) quantidade de recurso capturado por unidade de recurso disponível e (iii) taxa de matéria seca por unidade de recurso capturado. Além disso, se a disponibilidade de nutrientes e água para as plantas não for limitante, a radiação solar disponível para o processo fotossintético irá determinar a produção de fitomassa. Segundo Taiz e Zieger (2004), a radiação solar é um dos fatores que mais limitam o crescimento e desenvolvimento das plantas, uma vez que o sol é a origem de toda a energia necessária para a transformação do CO₂ atmosférico em energia metabólica.

A radiação solar global que incidente sobre a superfície da Terra pode ser separada em duas fases; uma quando a radiação é direta, e a outra é chamada de difusa, que é refletida ou espalhada por nuvens e pela atmosfera (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994). Em relação ao comprimento de onda, cada uma dessas fases pode ser dividida em duas bandas; a primeira é a de baixo comprimento de onda (inferior a 3000 nm) e a segunda é a radiação térmica (superior a 3000 nm).

Quando se analisa em separado a radiação de baixo comprimento de onda, separa-se esta também em bandas que possuem diferentes efeitos sobre as plantas. A faixa da radiação visível varia de 400 a 700 nm, e são especialmente estudadas na área agrônômica, devido ser radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (KUBINS, 1971).

A razão entre a RFA e a radiação solar é estimada entre 0,44-0,45 quando o sol está mais de 30° acima do horizonte, sem radiação difusa (MOON, 1940). Por outro lado, quando a elevação solar excede 40°, a razão estimada entre a RFA e a radiação total é 0,6, mas considerando a contribuição difusa. Combinando radiação difusa e direta em proporções apropriadas, a razão entre a RFA e a radiação solar é próxima de 0,5 (SINCLAIR MUCHOW, 1999) – bem adaptada aos trópicos segundo Moteith (1972) e Ometto (1981). Desta RFA incidente, em média 10% é refletida e 10% transmitida através das folhas, sendo o restante absorvido (LOVENSTEIN et al., 1995). Apenas 5% da energia total que incide na superfície terrestre é aproveitada pelas plantas para formação de carboidratos, o restante é emitida em comprimentos de ondas maiores, perdida na forma de calor e refletida (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Os termos radiação interceptada e radiação absorvida são geralmente usados com o mesmo significado na literatura; entretanto, Asrar et al. (1984) apontou uma sutil, mas importante, diferença entre os dois termos. Radiação interceptada não considera explicitamente a radiação absorvida. Embora os fótons devam ser interceptados antes de serem absorvidos, nem todos o são; alguns são dispersos (refletidos ou transmitidos). A diferença entre RFA interceptada e absorvida depende da cobertura e composição do dossel, densidade e reflectância. Se a copa tem uma cobertura completa, densa, e consiste de folhas verdes, então a RFA interceptada pode ser bem aproximada da RFA absorvida, considerando que folhas verdes saudáveis não refletem muita RFA. Este valor é aproximadamente 0,943, de acordo com a regressão de Daughtry et al. (1992).

A interceptação de radiação solar é uma função do índice de área foliar e do coeficiente de extinção luminosa (k) (PENGELLY et al., 1999). O coeficiente de extinção luminosa mostra a fração de radiação extinta ao longo do dossel vegetativo, devido a menor transmissividade luminosa (MONSI; SAEXI, 1953), e está relacionado à capacidade de interceptação de radiação fotossinteticamente ativa em um dossel (Figura 3A, II-I). Com o aumento do IAF ocorre um aumento da interceptação de radiação até um determinado valor. Nesse momento, ocorre um aumento do auto-sombreamento, ocasionando um acréscimo no coeficiente de extinção luminosa (CASAROLI et al., 2007).

A luz refletida por uma camada de folhas dentro da copa é em parte absorvida de novo por outras folhas (Figura 3B). Apenas uma porção da reflexão da copa é perdida, o que é indicado pelo coeficiente de reflexão do cultivo (ρ_c).

A transmissividade de luz em cultivo de soja, é dada por características do dossel vegetativo e pela presença de substâncias e pigmentos absorvedores, além de espessura de folhas e qualidade da luz (WOOLLEY, 1971). Sugere-se que a disposição das folhas dentro do dossel seja um fator de grande influência na distribuição da radiação solar sobre a superfície das folhas (SHIBLES; WERBER, 1966). Os feixes difusos e diretos da RFA diferem no modo como eles se transferem através das copas das plantas, afetando o somatório da fotossíntese. Desta forma, a razão entre eles é outro fator importante que influencia na distribuição da radiação solar. Para um dado valor de radiação solar, um aumento no componente difuso melhora a distribuição da luz no dossel, e a taxa de assimilação do cultivo aumenta (SINCLAIR et al., 1992).

Para a cultura de soja a radiação solar está relacionada com a fotossíntese, alongação de haste principal e ramificações, expansão foliar, pegamento de vagens e grãos e, fixação biológica (CÂMARA, 2000). De acordo com Shibles e Weber (1965), o total de fitomassa seca produzida pela soja depende da percentagem de RFA interceptada e da eficiência de utilização dessa energia pelo processo fotossintético. Em contrapartida, altas intensidades de radiação solar absorvidas pelas plantas podem levá-las a saturação luminosa, diminuindo a eficiência no uso da radiação (EUR) (JIANG et al., 2004; ADAMS; ADAMS, 1992).

Figura 3 – A) Relação entre o aumento no IAF e intensidade de luz calculada do topo para o interior do dossel, considerando: (a) $k=0.5$ e (b) $k=1$. Curva II, incluindo o coeficiente de reflexão da cultura $\rho_c=0.08$ (dia limpo), ilustra a contribuição das camadas de folhas individuais para a reflexão total do cultivo a (a) $k=0.5$ e (b) $k=1$. (II-I) Quantidade de luz absorvida pela cultura nos valores de k respectivos. ρ_c - coeficiente de reflexão para a maioria das superfícies verdes de um cultivo ao longo de um dia (sem dimensionamento); LAI= IAF.
B) Absorção, transmissão e reflexão de luz em uma folha.
Fonte: Lovenstein et al. (1995)

EUR é a eficiência na qual a radiação interceptada (ou absorvida) é convertida em biomassa (SINCLAIR; HORIE, 1989), e também é condicionada por muitos fatores, como água, temperatura, CO_2 e nitrogênio. EUR varia com o espaçamento entre fileiras de soja (BOARD et al., 1994) e entre espécies diferentes. Sob condições não limitantes de água, EUR é fator determinante da produtividade, sendo seu valor basicamente constante durante crescimento da cultura.

2.1.2.3 Fotoperíodo

O fotoperíodo é definido como o tempo em horas entre o nascer e o pôr-do-sol (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994). Em um determinado lugar, o fotoperíodo é função da latitude local (HARTWIG, 1973), sendo a principal variável associada à influência da data de semeadura sobre a maturação. Contudo, outras variáveis, como a acumulação térmica e a umidade do solo, podem apresentar efeitos importantes no desenvolvimento da cultura (PASCALE et al., 1963).

A soja é considerada uma planta de ‘dia curto’, sendo que o comprimento do dia afeta as taxas de emergência até a indução floral, em particular o tempo necessário para o florescimento (RODRIGUES et al., 2001). O fotoperíodo também possui importante papel na diferenciação dos órgãos florais (ZHANG et al., 2001), na microsporogênese (NIELSON, 1942) no desenvolvimento após o florescimento (JOHNSON et al., 1960; THOMAS; RAPER, 1976; RAPER; THOMAS, 1978; GUIAMET; NAKAYAMA, 1984) e formação dos grãos (RAPER; THOMAS, 1978) das plantas de soja.

A indução floral ocorre quando o comprimento do dia se torna menor que um valor ‘crítico’ para a cultivar; que é aproximadamente 13 horas para genótipos adaptados às regiões tropicais (SHIBLES, 1975). Uma consequência da indução floral antecipada é a precoce diferenciação de talos e folhas em órgãos reprodutivos, determinando o tamanho final da planta, e conseqüentemente, o seu potencial produtivo.

De acordo com Pascale (1986), tanto a floração quanto o enchimento dos grãos são retardados pelo aumento da duração do dia até o valor máximo de 16 horas, acima do qual ambos são inibidos. A altura da planta, o número de nós, comprimento dos internós e área da folha também aumentam, com o alongamento da duração do dia, para ambos as variedades cultivadas, tropicais e temperados, se medidos na floração. Sinclair et al. (2005) notou que a taxa de desenvolvimento de duas variedades de soja (BR-27 e BR-15) até o florescimento foi reduzida devido ao aumento do fotoperíodo de 11,5 até 14,2 horas. Nesse caso, a variedade BR-15 apresentou uma redução muito mais drástica em comparação com a cultivar BR-27. Sendo assim, o fotoperíodo é decisivo na duração do ciclo da planta e as variedades apresentam desempenhos distintos quando submetidos ao mesmo fotoperíodo.

Cultivares de maturação tardia são mais sensíveis ao fotoperíodo do que os de maturação precoce (JOHNSON et al., 1960) e em geral, cultivares de maturação tardia requerem noites mais

longas do que os precoces para chegar ao nível total de crescimento, assumindo níveis ótimos de temperatura (GRIMM et al., 1994).

A sensibilidade fotoperiódica da cultura de soja é uma restrição importante à sua adaptação em áreas de baixa latitude. As variedades cultivadas fora de sua zona de adaptação florescem muito cedo ou muito tarde (LOOMIS; CONNOR, 1992). A Figura 4 mostra que em áreas de baixa latitude (<20%) a magnitude fotoperiódica é baixa durante o ano. Em geral, o alcance máximo da diferença da duração do dia a 10° de latitude é 1 hora e 10 minutos, mas a 45° de latitude é 6 horas e 55 minutos (WHIGHAM; MINOR, 1978).

Figura 4 – Variação do fotoperíodo (em horas) em diferentes latitudes, e as respectivas datas de indução floral para planta de dias curtos (PDC)

Câmara et al. (1991), estudando o desempenho de 12 variedades de soja submetidas a diferentes fotoperíodos (12, 13 e 14 horas) e temperaturas variáveis conforme a época de semeadura, observaram que o período compreendido entre a emergência e o início do florescimento é influenciado pelas variações de fotoperíodo e temperatura.

A razão principal da adaptação da cultura de soja às condições de baixa latitude da savana brasileira (região do Cerrado) foi o desenvolvimento de novos genótipos conhecidos como ‘período juvenil longo’ (TOLEDO et al., 1994).

2.1.3 Adaptação da cultura de soja a baixas latitudes

A cultura de soja originou-se na Manchúria (45° Norte), ou Nordeste da China, e sua domesticação provavelmente se deu por volta do século 11 A.C., ou talvez um pouco antes. Algumas sementes de soja podem ter sido enviadas da China por missionários, e plantadas na França nos primórdios de 1740 (GIBSON; BENSON, 2005). A soja deve ter sido cultivada nos EUA no início de 1765 na Geórgia (HYMOWITZ; HARLAN, 1983); entretanto, a produção em larga escala começou um pouco antes da II Guerra Mundial (PROBST; JUDD, 1973).

No Brasil, a soja foi introduzida na Bahia em 1882, por Gustavo D’Utra. Da Bahia foi levada para São Paulo, onde se obteve os primeiros resultados experimentais, relatados em 1892 pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). No Rio Grande do Sul, a soja foi cultivada em 1900, mas só no final dos anos 40 é que o cultivo comercial iniciou-se naquele Estado e também em São Paulo (COSTA; MANICA, 1996).

Na década de 60, impulsionado pelo bom momento vivido pelo setor aviário nos Estados Unidos, a cultura se expandiu em latitudes entre 30°S e 20°S, principalmente nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo, e com a identificação de cultivares mais bem adaptadas às condições ambientais, os melhoristas passaram a combinar as características destas por meio de hibridação (BONETTI, 1983).

Percebeu-se, então, que estas variedades cultivadas sob latitudes ainda mais baixas, como a dos Cerrados, floresciam muito cedo após a emergência, gerando plantas baixas que eram difíceis de serem colhidas mecanicamente, assim como menor produtividade. Por volta dos anos 80, a EMBRAPA avançou ainda mais na pesquisa sobre fotoperíodo. Hartwing e Kiihl (1979) identificaram uma característica em sojas PI159925 que atrasou a floração em ambientes sob fotoperíodo curto, chamado-a de ‘longa juvenilidade’. O desenvolvimento desta tecnologia abriu para a produção de soja às regiões Oeste e Norte do país que se situam abaixo de 20°, incluindo áreas próximas da Linha do Equador. As variedades de soja com período juvenil longo (PJL) são especialmente importantes por aumentarem seu alcance em baixas latitudes, permitindo maior flexibilidade aos períodos de semeadura dentro da mesma latitude.

Programas de melhoramento de soja para baixas latitudes foram o ponto inicial para o subsequente cultivo comercial desta cultura na estação de ‘seca’ (inverno). Atualmente, se as temperaturas não estão muito baixas e se há irrigação adequada, o cultivo de soja é possível nos Cerrados nesta época do ano.

Baseado no reconhecimento das áreas de adaptação, as variedades cultivadas de soja foram classificadas em grupos de maturação, dependendo de sua responsividade ao ambiente. Atualmente, existe uma grande variedade de cultivares de soja, o que permite uma ampla área de cultivo em diferentes latitudes. A classificação dessas variedades cultivadas em grupos de maturação se baseia no número de dias da emergência até a maturidade para colheita. As variedades cultivadas de soja se localizam em um de 12 grupos indo de 00 a 4 designados como de maturação precoce, e de 5 a 10 designados como de maturação tardia. Grupos de 00 a 1 são adaptados aos dias mais longos e temperaturas mais frias do Hemisfério Norte, enquanto grupos de 2 a 8 são adaptados conforme vão progressivamente mais para Sul (LOOMIS; CONNOR, 1992). O último grupo de maturação é o 10, que inclui variedades cultivadas desenvolvidas para produção em ambientes tropicais de baixas latitudes ($<10^{\circ}\text{S}$).

Figura 5 – Grupos de maturação de cultivares de soja para diferentes latitudes no Brasil
Fonte: Penariol (2000)

2.2 Modelagem em agricultura

Para que os resultados das pesquisas sejam confiáveis, existe a necessidade da realização de experimentos agrícolas, com certo custo de instalação, manutenção e obtenção dos dados. Além disso, o tempo necessário para a condução de experimentos nem sempre é disponível. Em muitos casos, não existe a possibilidade de instalação de experimentos exigindo-se que a tomada decisória seja rápida. Para contornar estas situações pode-se propor a descrição de um sistema real que o represente na escala do objetivo do estudo. Para que esta ‘simplificação’ seja possível, exige-se que exista um elevado conhecimento dos conceitos básicos de funcionamento do sistema. Assim, é possível a elaboração de modelos matemáticos que representem o problema de forma mais eficiente e, posteriormente, haja uma transcrição para a linguagem computacional, viabilizando o acompanhamento da dinâmica desse sistema pela simulação de cenários alternativos, muitos deles ainda não testados em sistemas reais (PESSOA et al., 1997).

A palavra modelo é derivada de ‘modus’ e representa uma medida, implicando em uma mudança de escala e suas determinações. Conceitualmente, são as representações idealizadas para situações do mundo real (CAIXETA FILHO, 2001), ou ainda, equações ou conjunto delas, podendo representar quantitativamente as suposições e hipóteses idealizadas sobre o sistema real (THORNLEY, 1976). A modelagem é dependente de um sistema, que é o conjunto de componentes e inter-relações, dependendo do objetivo do estudo. A interpretação dada aos fenômenos envolvidos no sistema está correlacionada ao nível de exatidão obtida na sua descrição.

A utilização de modelos é realizada há mais de 270 anos, com o objetivo de quantificar os efeitos das variáveis ambientais no crescimento e no desenvolvimento das culturas. Evidente é que tal afirmação é baseada no fato de que Réaumur, em 1735, fez a associação entre temperatura (graus-dia) e o desenvolvimento de culturas. Ele estava propondo um dos modelos empíricos mais eficientes que se conhece em agrometeorologia (COSTA, 1997).

Em geral, modelos podem ser usados para investigar uma série de assuntos relacionados à produção vegetal. Eles servem para facilitar o entendimento quanto ao comportamento da cultura dentro de seu contexto ambiental, podendo ser usados em escalas regional e global, para prever ou explorar o potencial produtivo sob certas condições (ITTERSUM et al., 2003; BOUMAN et al., 1996), podendo ser utilizados como ferramenta de gerência e tomada decisória (MEINKE; HOCHMAN, 2000). Além disso, os modelos de simulação são utilizados para verificar teorias e

testar hipóteses, melhorar o conhecimento sobre um determinado processo, alimentando bases de dados com as informações obtidas e obter estimativas da produtividade de grãos (MUNAKATA, 1995; BOOTE et al., 1996). Segundo Munakata (1995), os estudos de simulação de crescimento das culturas podem ser definidos em duas linhas: (i) aquela que considera a estrutura do dossel da planta (características para a interceptação da luz); e (ii) a dinâmica da produção de fitomassa seca (crescimento).

Nas últimas décadas, grandes progressos foram feitos com base no desenvolvimento de modelos que simulam o crescimento e produção de culturas em muitos ambientes (MOEN et al., 1994; CHIPANSHI et al., 1999). Aplicações típicas incluem zoneamento agroecológico, previsão de produtividade regional e estudos de cenário para explorar o efeito das mudanças ambientais ou sócio-econômicas na agricultura (BOUMAN et al., 1996). Pesquisadores de diversas partes do mundo vêm usando vários modelos de estimativa de produtividade de culturas, testando a habilidade na simulação de eventos fenológicos de produção de biomassa (DOURADO NETO, 1999).

Contudo, no Brasil, apesar de alguns exemplos de sucesso, as técnicas de modelagem não estão sendo desenvolvidas, nem utilizadas em seu pleno potencial. Desenvolvimento e utilização de modelos são conceitos distintos. Para se formar uma massa crítica em modelagem e aproveitar todo o benefício didático e científico dos modelos, é necessário que os mesmos sejam desenvolvidos - ou se já existem modelos similares em outros países, que sejam adaptados, levando-se em conta as condições brasileiras. Nesse tocante, é importante ressaltar a disponibilidade de sistemas computacionais que atinjam uma vasta gama de usuários.

Devido às complexidades físicas e necessidade de equipamento multidisciplinares para o desenvolvimento de modelos, a comunidade científica agrometeorológica é aquela que possui condições para liderar o movimento para fortalecimento desta linha de pesquisa. O desenvolvimento e aplicação de modelos de simulação em conjunto com a experimentação convencional em maior escala em nosso país é um desafio que devemos seguir e que, sem dúvidas, tornará a atividade científica mais eficiente (COSTA, 1997).

2.2.1 Componentes do processo de modelagem

Existem diversas formas de representar a seqüência do processo de modelagem, dentre elas, a execução de um fluxograma é fundamental para organizar o conhecimento em uma seqüência lógica. Nesse fluxograma, alguns elementos são fundamentais para que o processo seja executado com qualidade.

O procedimento de modelagem é iniciado por intermédio do entendimento correto dos objetivos do modelo a ser construído, que devem ser claros e bem definidos, baseados no conhecimento do problema a ser resolvido. Caso eles sejam amplos, devem ser subdivididos em ordem de prioridade. Os objetivos devem ser suficientemente completos, para que a partir deles, possam ser determinados os parâmetros de entrada, o conjunto de equações a ser utilizada, a metodologia aplicada e as características dos resultados que serão obtidos.

No processo dinâmico de construção do programa computacional, em que as equações são transformadas em linguagem computacional, é aconselhável que os resultados dos cálculos apresentados pelo computador sejam comparados com outros resultados já existentes na literatura, para evitar que os erros não sejam encontrados, devido à complexidade e da magnitude do programa. É um conjunto de atividades necessárias para verificar a precisão dos enunciados e das equações propostas. A verificação corresponde conferência se os algoritmos e os códigos computacionais estão corretos para as definidas relações matemáticas.

Os modelos devem ser avaliados de acordo com os objetivos inicialmente propostos, e não pelo fato de não contemplarem uma ou outra área de conhecimento. Há várias maneiras de se realizar o que se chama ‘teste empírico do modelo’. Uma delas é a comparação dos dados reais com os simulados. É importante ressaltar que este teste é apenas parte da avaliação total do modelo.

Outra técnica é a análise sensitiva, que pode ser realizada em relação aos parâmetros ou em relação aos dados de saída do modelo. Tais resultados devem estar dentro de uma amplitude com aceitação científica. A calibração do modelo também faz parte das técnicas de avaliação do modelo, visto que tal técnica é o ajuste de certos parâmetros ou relações para que ele adéqüe melhor seu desempenho em certas áreas. Em outras palavras, é o ajuste dos parâmetros do modelo para a situação em questão.

O estágio de ‘validação’ está relacionado com o estabelecimento da similaridade das respostas do modelo, pela comparação das mesmas com um conjunto de observações

independentes. Esta etapa muitas vezes não é possível pela complexidade da modelagem. Nessa etapa ocorre a comparação dos dados reais com os dados simulados, mas esse procedimento somente é uma parte da avaliação total do modelo. Essa etapa deve ser realizada com prudência para evitar erros de interpretação (COSTA, 1997).

2.3 Produtividade potencial

Define-se produtividade potencial de grãos como a produção de uma variedade cultivada em ambiente ao qual está adaptada, sem limitações edafoclimáticas e nutricionais, livre da ação de pragas e doenças, e com os demais estresses efetivamente controlados (EVANS, 1993). Segundo Cooper (2003), os objetivos de estudar as produtividades máximas são: (i) tentar repetir nos campos de multiplicação as produtividades encontradas nas parcelas experimentais; (ii) detectar os fatores limitantes da produção de soja e (iii) identificar as produtividades máximas possíveis para soja.

Quando o objetivo é observar a produtividade potencial de uma determinada espécie, primeiramente devem-se entender as inter-relações entre o genótipo, o ambiente e o manejo. Quanto maior for o conhecimento do genótipo, melhor será a utilização desse para potencializar o seu uso. O ambiente de produção também deve ser conhecido quanto as suas potencialidades, para melhorar os aspectos deficitários e maximizar a utilização das características favoráveis. Os elementos que constituem o meio são os bióticos e abióticos, que podem ser favoráveis ou desfavoráveis à produção. Dentre os bióticos estão as pragas, doenças, plantas daninhas e microrganismos fixadores de nitrogênio. No caso dos abióticos, têm-se os elementos do clima e do solo, que irão interferir de diferentes formas, conforme a sua intensidade de presença. Dessa forma, o ambiente deve favorecer ao máximo o desenvolvimento e a produção da espécie escolhida para o cultivo. E por último, deve-se destacar o homem e a sua capacidade de modificação do meio. A gerência e a modificação do ambiente, ou sistema, devem-se a sensibilidade de percepção que o homem possui sobre as interações existentes entre o ambiente e a planta. Os fatores limitantes da produtividade devem ser rapidamente superados para que o potencial produtivo da cultura seja explorado ao máximo.

Os sistemas de simulação de produção devem definir a cultura a ser utilizada em determinada região, além do manejo aplicado. Segundo Driessen e Konijn (1992), modelos de simulação de produção são compostos por inúmeros outros modelos, cada etapa determina os

requerimentos utilizadas em cada região, além da qualidade da região, para assim estimar a produção potencial. Primeiramente, será quantificada a performance da cultura, onde será levada em consideração somente a temperatura e a radiação solar. As demais características do local, onde será estimada a produção potencial, serão consideradas em nível máximo para o desenvolvimento da cultura.

A orientação de processos de modelos de crescimento de plantas tem sido usada extensivamente em estudos de impactos climáticos (ALEXANDROV; HOOGENBOON, 2000), devido a mudanças climáticas alterarem a simulação do crescimento de plantas.

Segundo Cooper (2003), o primeiro concurso nacional de produtividade de soja nos Estados Unidos ocorreu em 1966, e registrou o recorde de produtividade de 4.000 kg.ha^{-1} , e as produtividades em parcelas experimentais variaram de 3.000 a 4.000 kg.ha^{-1} . Esses resultados foram obtidos na Universidade de Minnesota. Logo após foram registrados 6.000 kg.ha^{-1} (1967) por quatro agricultores. E no ano seguinte superou-se 6.700 kg.ha^{-1} . Nesse período, as plantas de soja eram altas, com aproximadamente 150 cm em R_2 , e elevadas produtividades eram alcançados quando algum evento climático não ocasionava o acamamento das plantas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do modelo LINTUL

Para muitos estudos variando de escala regional à global, modelos existentes necessitavam maiores simplificações, pois a disponibilidade e qualidade dos dados de entrada eram mais restritivos que o conhecimento dos processos básicos incorporados neles. Nos anos 90, Spitters argumentou que um modelo de simulação de produtividade de cultura - SUCROS (Simple and Universal CROp growth Simulator – simulador simples e universal para o crescimento de culturas, em português), no qual a abordagem da fotossíntese era incluída, poderia ser simplificado, incorporando apenas os processos determinantes que mais afetam o crescimento das culturas. Esta foi a primeira abordagem de um modelo que, mais tarde, seria batizado como LINTUL (Light INTerception and UtiLization - Interceptação e Utilização da Luz em português) (BOUMAN et al., 1996).

No modelo LINTUL, a produção de matéria seca é calculada usando relações lineares entre a produção de biomassa e a quantidade de radiação interceptada pela cultura (MONTEITH, 1977), crescidas sob adequadas condições de disponibilidade de água e nutrientes, na ausência de pragas, doenças e plantas daninhas. Essa relação determina um limite finito para o potencial de produtividade, que também pode ser modelado sem entrar em descrições detalhadas do processo de fotossíntese e respiração. O total de biomassa formado é dividido em raízes, hastes, folhas e grãos (SPITTERS, 1990), usando frações de alocação definidas em função do estágio de desenvolvimento fenológico da cultura. As massas de matéria seca dos órgãos da planta são obtidos pela integração de suas taxas de crescimento ao longo do tempo.

As simulações correm na cadência temporal de 1 dia, com integração retilínea (Euler) das taxas. As entradas de informações requeridas pelo modelo incluem propriedades fisiológicas da cultura e as condições de tempo atuais do local, caracterizadas pela sua latitude, temperaturas máxima e mínima diária e irradiação para cada dia do ano.

A descrição do LINTUL no que diz respeito à fenologia da cultura e condições ambientais, desenvolvimento da área foliar, eficiência no uso da radiação e divisão da produção da biomassa foi baseada em van Oijen and Leffelaar (2007, 2008). Informações adicionais foram reunidas da literatura.

3.1.1 Desenvolvimento fenológico da cultura e efeitos ambientais

Uma das características mais importantes da cultura que deve ser levada em conta no estabelecimento do potencial produtivo é o desenvolvimento fenológico (van KEULEN; WOLF, 1986). O desenvolvimento é um processo irreversível de mudança no estado de um organismo, que geralmente progride de acordo com um padrão mais ou menos fixo, e inerente a cada espécie (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994). O estágio de desenvolvimento de uma cultura quantifica sua 'idade fisiológica' e está relacionada à sua aparência morfológica.

Muitos fatores ambientais podem acelerar ou reduzir a taxa de desenvolvimento fenológico (PENNING DE VRIES et al., 1989), como por exemplo, a temperatura, que pode afetar diferentemente os estádios vegetativos e reprodutivos.

Para que fosse possível medir o desenvolvimento da planta, foram designadas escalas que são, contudo, diferentes para cada espécie vegetal. Tipicamente, uma escala de desenvolvimento não possui dimensões, o progresso numa escala é irreversível e seu valor aumenta gradualmente. No modelo LINTUL, o desenvolvimento começa com o valor 0,0 na emergência, atinge 1,0 na antese e na maturação o valor alcança 2,0. A ocorrência da antese é o marco principal na escala de desenvolvimento. Antes da antese, o estágio de desenvolvimento é medido com base em outras características relacionadas, como o número de n nós na haste principal, começando com o nó unifoliado.

Temperatura

A fim de calcular o desenvolvimento fenológico da cultura de soja (DF^1), é necessário obter a sua taxa de alteração ao longo do tempo (TDF, d^{-1}). Um problema em quantificar esta taxa de desenvolvimento, é não poder mensurá-la diretamente. Ao invés disso, ela é obtida pelo inverso do tempo, em dias, necessário para completar uma unidade de desenvolvimento, por exemplo, da emergência à floração ou da floração à maturidade.

A taxa de desenvolvimento está relacionada linearmente com a temperatura em um amplo espectro. Geralmente, existe um máximo na curva de resposta acima do qual a taxa de desenvolvimento diminuirá, e há também certo limiar mínimo, abaixo da qual não ocorre desenvolvimento. No meio destas temperaturas, a taxa de desenvolvimento é praticamente

---

¹ As abreviações dentro dos parenteses referem-se às traduções das siglas usadas no programa LINTUL1

proporcional à temperatura efetiva (TEF,°C), que corresponde a temperatura média descontada a temperatura basal.

$$GD = \int_{i=1}^n \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right) - T_{bi} \quad (1)$$

Onde: GD é o total de graus-dia acumulado; $T_{\max}$, $T_{\min}$ e T_{bi} são respectivamente temperaturas máxima, mínima e basal inferior, em °C; n é o número de dias do período em questão.

Para $T_{\max} - T_{\min} / 2 > 10^{\circ}\text{C}$

Na prática, esta integral é freqüentemente expressa como ‘soma térmica’, ou graus-dia acumulados (GD,°C.d).

O acúmulo de graus-dia é calculado através de uma função de interpolação linear (FTEMP), que relaciona a taxa de desenvolvimento (TDF, d^{-1}) com temperatura (Figura 6). Há um limite de temperatura basal inferior (T_{bi} ,°C) e superior (T_{bs} ,°C), abaixo e acima das quais não haverá desenvolvimento, e limite de temperatura ótima inferior (T_{oi} ,°C) e superior (T_{os} ,°C) onde a resposta da cultura será excelente. Como no presente modelo não se adotou variações de temperatura para cada fase do desenvolvimento da cultura, procurou-se, com base na literatura citada, adotar os valores médios ótimos para o desenvolvimento da planta durante todo o ciclo. Dessa maneira, o cálculo do acúmulo de graus-dia a certa taxa de desenvolvimento será descrito como $T_{bi} + 1/\alpha * \text{TDF}$, ou simplesmente $\Delta\text{Temp} * \text{TDF}$, em °C, uma vez que a temperatura basal inferior necessita ser descontada.

O estágio de desenvolvimento (DF) a qualquer momento do ciclo - antes ou depois da antese - é então calculado integrando sua taxa de desenvolvimento (TDF, d^{-1}), que por sua vez é a razão entre a soma térmica em dado momento n e a soma térmica necessária para se atingir a antese (GD1,°C.d), ou a maturação (GD2,°C.d), que são parâmetros fixos do modelo.

Figura 6 – Relação entre a taxa de desenvolvimento (TDF, d^{-1}) e a temperatura ($^{\circ}C$), para cálculo do acúmulo de graus-dia ($^{\circ}C.d$). Para: $T_{bi}=10^{\circ}C$; $T_{bs}=40^{\circ}C$; $T_{oi}=28^{\circ}C$ e $T_{os}=32^{\circ}C$

Comprimento do dia

Como a soja é uma planta de ‘dia curto’, sua indução floral irá ocorrer quando o fotoperíodo ambiental for menor que o fotoperíodo crítico. Como extensamente comentado nos itens 2.1.2.3 e 2.1.3, o valor médio de fotoperíodo para cultivares sem período juvenil longo gira em torno de 13 horas. Para as variedades cujo período juvenil foi ‘alongado’, por premissa o fotoperíodo crítico foi reduzido. A tolerância ao fotoperíodo varia entre cultivares, e para o presente caso, adotar-se-á os valores apresentados na Figura 7, considerando-se que, em baixas latitudes ($<10^{\circ}$), o alcance máximo da diferença da duração do dia é 1 hora e 10 minutos.

Como o comprimento do dia altera a taxa de desenvolvimento da cultura, tal efeito será computado no modelo LINTUL-soja através da modificação no acúmulo de graus-dia (VGD, $^{\circ}C$).

Figura 7 – Platô linear para cálculo do efeito do fotoperíodo (em horas) na taxa de desenvolvimento da cultura (TDF, d⁻¹)

O comprimento do dia (d) é calculado no modelo em função da elevação solar (ângulo do sol acima do horizonte), determinada pela latitude e dia do ano (GOUDRIAAN; VAN LAAR, 1994):

$$d = 12 * \left[1 + \left(\frac{2}{\pi} \right) * a \cdot \sin \left(\frac{\sin \lambda \sin \delta}{\cos \lambda \cos \delta} \right) \right] \quad (2)$$

Onde: $\sin \lambda \sin \delta$ é o deslocamento solar dependente de sazonalidade em relação à linha do Equador; $\cos \lambda \cos \delta$ é a amplitude dependente de sazonalidade do seno da altura solar; δ é a declinação solar em relação à linha do Equador, em radianos, e λ é a latitude, em radianos.

3.1.2 Crescimento e senescência foliar

As folhas são os maiores órgãos fotossintetizantes, e o cálculo da radiação fotossinteticamente ativa interceptada é fortemente baseada na área de suas superfícies. A simulação correta do curso temporal do índice de área foliar é o primeiro requisito para uma correta simulação do crescimento da cultura. A quantidade de folhas e a velocidade com que são formadas no começo do período de crescimento, são de considerável importância para a

produtividade final. Toda a área da folha é tratada como sendo igualmente efetiva na fotossíntese, e a transpiração é exposta às mesmas condições.

Basicamente, existem duas situações diferentes no que diz respeito a formação de uma nova área foliar: no início do período de crescimento, quando a cobertura do solo é ainda pequena, o crescimento pode ser limitado pela ‘capacidade do dreno’, e mais tarde, quando a disponibilidade dos fotoassimilados determina a formação de novas áreas foliares, o crescimento da folha tende a se tornar limitado pela ‘capacidade da fonte’.

A quantificação do IAF durante o crescimento inicial da cultura, ou seja, durante a fase juvenil, varia consideravelmente em função de condições ambientais e cultivar. Para alguns autores (OMAFRA, 2002; GOMES, 2007), o estágio V1 é geralmente alcançado entre 10 e 15 dias após a emergência, com um IAF correspondente entre 0.5-1.0. Nesta fase, a temperatura é o fator predominante; a taxa de aparecimento de novas folhas e seu tamanho final são limitados pela temperatura através de seus efeitos na divisão e crescimento celular. Neste estágio inicial, a área da folha aumenta exponencialmente ao longo do tempo:

$$\frac{\Delta IAF}{\Delta t} = cr \cdot IAF \quad (3)$$

Considerando-se cr a taxa de crescimento relativo da folha (d^{-1}) e IAF o índice de área foliar ($m^2(\text{folha}) \cdot m^{-2}(\text{solo})$).

Esta taxa de crescimento relativo (c_r) é um produto da taxa de crescimento relativo da área foliar durante o crescimento exponencial ($cr_{exp}, ^\circ C \cdot d^{-1}$), e da temperatura efetiva diária (TEF, $^\circ C$). Integrando a eq.(3) e substituindo cr temos:

$$IAF = IAF_0 \cdot e^{(cr_{exp} \cdot TEF \cdot t)} \quad (4)$$

Portanto, a taxa de desenvolvimento da área foliar ao longo dos intervalos de tempos diário é então calculada como:

$$IAF_{t+\Delta t} = IAF_t \cdot e^{(cr_{exp} \cdot TEF \cdot \Delta t)} \quad (5)$$

com IAF_t e $IAF_{t+\Delta t}$ a atual área foliar e a área da folha ao final do intervalo de tempo Δt , respectivamente.

Então, a taxa de aumento na área foliar durante o crescimento juvenil a ser usada no modelo pode ser calculada com exatidão por:

$$\frac{\Delta IAF}{\Delta t} = \frac{IAF_{t+\Delta t} - IAF_t}{\Delta t} = \frac{IAF_t (\exp^{(cr_{exp} \cdot TEF \cdot \Delta t)} - 1)}{\Delta t} \quad (6)$$

Seguindo o estágio juvenil, a disponibilidade dos assimilados determina a formação de novas áreas foliares. O sombreamento mútuo das plantas reduz o fornecimento de fotoassimilados por ponto de crescimento. Durante este estágio, o modelo calcula o crescimento da área foliar multiplicando o aumento da matéria seca das folhas pela área foliar específica de novas folhas. Neste método, a área foliar específica funciona como a razão entre a área foliar e biomassa da mesma, e relaciona a recente fração adicionada de área foliar.

$$\frac{\Delta IAF}{\Delta t} = MSf \cdot AFE \quad (7)$$

com MSf (g(folha).m⁻²(solo)) a matéria seca das folhas e AFE (m²(folha).g⁻¹(folha)), a área foliar específica de novas folhas.

Com relação a senescência das folhas, a mesma é descrita com base em uma taxa relativa de mortalidade (TRM,d⁻¹) elevada ao máximo por: (i) uma taxa relativa de mortalidade devido ao envelhecimento (TME,d⁻¹), que ocorre apenas após a antese, (ii) devido o auto-sombreamento (TMS,d⁻¹). Esta taxa é aplicada tanto ao IAF quanto a biomassa das folhas verdes, para cálculo da taxa de senescência.

O índice de área foliar é obtido integrando o resultado da taxa de crescimento foliar e a taxa de senescência foliar ao longo do tempo.

3.1.3 Conversão da radiação solar em biomassa

Eficiência no uso da radiação (EUR, g(matéria seca).MJ⁻¹) é a razão entre biomassa produzida (g.m⁻².d⁻¹) e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, MJ.m⁻².d⁻¹), que sob condições ótimas de desenvolvimento, é tida como linear no tempo (MONTEITH, 1972).

Os valores diários de RFA interceptada são derivados assumindo que a interceptação de radiação aumenta com o aumento do IAF de acordo a uma função exponencial negativa do índice de área foliar, caracterizada pelo coeficiente específico de extinção de luminosa, k . Então, a RFA interceptada depende da radiação solar incidente – neste caso, a fração que é fotossinteticamente ativa, correspondente a cerca de 50% da radiação total diária – e do IAF, de acordo com a lei de Beer–Bouguer–Lambert:

$$R_{\text{int}} = 0.5Q_g \left[1 - \exp^{(-kIAF)} \right] \quad (8)$$

Na qual R_{int} é a RFA interceptada ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), Q_g é a radiação global diária ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), k o coeficiente de extinção para a RFA ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) e IAF o índice de área foliar ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$).

A soja, por ser uma planta C3, possui ponto de saturação luminoso a relativamente baixos valores de radiação, quando comparada às plantas C4. Isso significa que, mesmos com altos valores de radiação, o uso eficiente da luz não pode ser potencializado.

Para uma única folha, a relação entre a interceptação de RFA e a fotossíntese segue uma curva típica de saturação, indicando o decréscimo na EUR com o aumento nas intensidades luminosas. Entretanto, como em cultivos no campo a maioria das folhas está exposta a intensidades não saturantes durante a maior parte do dia, a EUR diária torna-se constante (MONTEITH, 1977; SINCLAIR, 1991; SINCLAIR; MUCHOW, 1999).

A taxa de crescimento total diária da cultura ($\text{g(matéria seca).m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) é então calculada multiplicando a quantidade de RFA interceptada pela EUR constante.

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = EUR * R_{\text{int}} \quad (9)$$

com EUR a eficiência no uso da radiação ($\text{g(matéria seca).MJ}^{-1}$) e R_{int} a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), calculada na eq.(8).

A biomassa total da cultura é então obtida integrando a eq. (9) ao longo do tempo.

3.1.4 Partição de biomassa

A partição de biomassa é o processo pelo qual os fotoassimilados disponíveis para o cultura são alocados para as raízes, folhas, hastes e grãos. Embora apenas parte da biomassa total seja colhida, todos os componentes são importantes para a alocação de novas matérias secas, mesmo antes que os produtos econômicos sejam formados. Crescimento e desenvolvimento não são o mesmo que distribuição de biomassa, sendo o último uma função da idade fisiológica, que se caracteriza pela ordem e taxa de aparecimento de vários órgãos.

O padrão de crescimento da cultura de soja considerado no presente estudo é o determinado. Geralmente, o padrão é tal que a maior porção é inicialmente atribuída às folhas, raízes e hastes, seguida por um período no qual esses órgãos e os reprodutivos crescem juntos. Na fase final, apenas os órgãos de armazenamento aumentam em massa de matéria seca. O momento no qual os órgãos reprodutivos, neste caso as vagens, começam a crescer é geralmente algumas semanas após a primeira flor aparecer.

O fluxograma do modelo LINTUL-soja é apresentado na Figura 8. A simulação baseia-se em: (a) radiação solar; (b) fração da RFA interceptada pela cultura; e (c) a eficiência no uso da radiação (EUR) na conversão de luz em matéria seca. O desenvolvimento fenológico é guiado pela temperatura acumulada e também pelo fotoperíodo. Os estádios de desenvolvimento determinam a divisão da matéria seca. O modelo estima a produtividade potencial, quando suprimento de água e nutrientes não são limitantes, e nenhum fator de redução como ervas daninhas, pragas e doenças ocorrem.

Figura 8 - Fluxograma do modelo LINTUL-soja

Abreviações usadas no diagrama: DTR- daily global radiation (radiação diária total); PARINT- Intercepted PAR (radiação fotossinteticamente ativa interceptada); KDF- light extinction coefficient (coeficiente de extinção de luz); RUE- radiation use efficiency (eficiência no uso da radiação); WLVG- weight of green leaves (massa de matéria seca das folhas verdes); WLVD- weight of dead leaves (massa de matéria seca das folhas mortas); WST- weight of stems (massa de matéria seca da haste); WSO- weight of storage organs (massa de matéria seca dos grãos); WRT- weight of roots (massa de matéria seca das raízes); LAI- leaf area index (índice de área foliar); GLAI- rate of increase in leaf area (taxa de aumento na área foliar); DLAI- death rate of LAI (taxa de mortalidade do IAF); Basetemp (temperatura basal); SLA: Specific leaf area (área foliar específica); RMLVG- rate of increase weight of green leaves (taxa de aumento na massa de matéria seca das folhas verdes); RWST- Rate of increase weight of stems (taxa de aumento na massa de matéria seca das hastes); RWSO- Rate of increase weight of storage organs (taxa de aumento na massa de matéria seca dos grãos); RWRT- Rate of increase weight of roots (taxa de aumento na massa de matéria seca das raízes); RTSUM- rate of change of temperature sum (variação dos graus-dia); TSUM- temperature sum (graus-dia acumulados); GTOTAL- Growth rate of total crop dry matter (taxa de crescimento da matéria seca total); DAVTMP- Daily average temperature (temperatura média); DLV- Death rate of leaves (taxa de mortalidade das folhas).

Linhas contínuas e tracejadas indicam fluxo de material e informação, respectivamente

Fonte: Oijen e Leffelaar (2007)

3.2 Parametrização do modelo LINTUL para a cultura de soja

O modelo LINTUL foi inicialmente desenvolvido por Spitters e Schapendonk (1990) para prever o acúmulo de matéria seca baseada na aproximação da EUR para batata, porém, adaptações têm sido feitas nas últimas décadas testando sua utilidade para diferentes cultivos, como trigo e milho. O cultivo de soja nunca foi testado.

Devido a sua ‘simplicidade’, a qualidade dos dados inseridos é extremamente limitada quando comparada ao conhecimento dos processos básicos incorporados no cálculo do modelo.

LINTUL-soja é uma adaptação do modelo LINTUL parametrizado para trigo irrigado. Para sua adaptação à cultura de soja, os seguintes ajustes estruturais foram feitos: (i) a introdução de função (platô-linear) para cálculo da sensibilidade ao fotoperíodo, durante o período decorrido entre V1 e a antese, e (ii) introdução de função temperatura (três segmentos lineares) para cálculo do aumento diário na soma térmica e, conseqüentemente, o estágio de desenvolvimento fenológico, com base em valores limítrofes para desenvolvimento da cultura.

Outras modificações a saber foram feitas também para adaptar o modelo LINTUL aos parâmetros disponíveis para a soja:

No LINTUL-trigo, a emergência da plântula ocorre em função do tempo, dependendo apenas no número do dia de emergência (parâmetro dado). Na adaptação atual, a emergência ocorre quando o acúmulo de graus-dia acima do limiar alcança o valor mínimo conhecido para emergência (GDEM, °C.d)

A massa de matéria seca inicial das raízes na emergência não é mais tida como zero, como ocorre no LINTUL-trigo. A radícula começa a se estender para baixo dentro de 24-48 horas após a semeadura, e quando os cotilédones emergem, sua massa é aproximadamente 25% da massa de matéria seca total das novas folhas (dados não publicados).

A resposta do modelo pode ser visualizada tanto em graus-dia quanto em estágio de desenvolvimento; ambos prescrevem o mesmo momento no ciclo da cultura.

Os parâmetros de entrada necessários ao modelo são apresentados na Tabela 1. A maior parte deles foi obtida em experimento de campo conduzido pela Embrapa-Cerrados, detalhado abaixo. A literatura disponível suplementou os demais parâmetros necessários para essa pesquisa.

Tabela 1 - Parâmetros do modelo LINTUL referentes à cultura de soja

Parâmetros	Abreviação	Unidade
<i>Parâmetros obtidos através de experimento</i>		
Soma térmica entre a semeadura e a emergência	GDEM	°C.d
Soma térmica entre a emergência e antese	GD1	°C.d
Soma térmica a antese e maturação	GD2	°C.d
Área foliar específica	AFE	m ² .g ⁻¹
Área foliar inicial (emergência)	IAFi	m ² .m ⁻²
IAF acima do qual há auto-sombreamento	IAFcr	m ² .m ⁻²
Coefficientes de partição de fotoassimilados para os órgãos:		
-raízes	CPR	-
-folhas	CPF	-
-hastes	CPH	-
-grãos	CPG	-
<i>Parâmetros obtidos com base na Literatura</i>		
IAF no final da fase juvenil	IAFju	m ² .m ⁻²
Soma térmica durante a fase juvenil	GDJU	°C.d
Taxa de crescimento relativo do IAF durante a fase juvenil	cr _{exp}	(°C.d) ⁻¹
Coefficiente de extinção luminosa	k	m ² .m ⁻²
Eficiência no uso da radiação	EUR	g.MJ ⁻¹
Temperaturas limítrofes para desenvolvimento da cultura		°C
-basal inferior	Tbi	°C
-basal superior	Tbs	°C
-ótima inferior	Toi	°C
-ótima superior	Tos	°C
Resposta fotoperiódica	-	horas

Experimento

O experimento foi conduzido no campo experimental da Embrapa Cerrados (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias) em Planaltina-DF, estado de Goiás, Brasil (1007 metros acima do nível do mar, 15°35'30" S e 47°42'30" W) no ano safra de 1988-1989. O mesmo avaliou o padrão de crescimento de 10 diferente variedades cultivadas de soja – todos contendo período juvenil longo – e semeados em 8 de Novembro, sob condições idênticas de manejo, sem limitações edafoclimáticas e nutricionais, livre da ação de pragas e doenças, e com os demais estresses efetivamente controlados, como descrito pela EMBRAPA (1994). A análise do crescimento baseou-se na variedade cultivada Savana, de maturação tardia.

As unidades experimentais foram aleatorizado em blocos com 4 repetições. Em cada unidade, foram instaladas 10 áreas amostrais de 1,2 m² cada, e uma área de 4 m² para a colheita final. As amostras foram coletadas da terceira semana após a semeadura em diante, uma vez a cada duas semanas. Inicialmente, as plantas foram divididas em parte aérea e raiz. Na primeira, após a obtenção da massa de matéria seca total, uma subamostra foi usada para determinar a área foliar, pecíolo, haste, vagem e sementes. Estas partes foram então secas (70°C) e a massa da matéria seca determinado. Quanto à raiz, uma porção foi removida como subamostra, lavada e seca. A massa da matéria seca total e suas partes foram calculados baseados na massa da matéria seca das subamostras.

As temperaturas diárias (mínima e máxima), e a radiação solar foram obtidas junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

3.2.1 Caracterização climática

A Figura 9 ilustra a variação da temperatura média diária em Planaltina-DF, ano safra 1988/1989, desde a semeadura até o estágio de maturação da variedade Savana, em função dos dias após a semeadura (DAS,d). Nota-se que, durante todo o ciclo, não foram reportadas grandes alterações de temperatura média. Em ambos os períodos analisados - entre a semeadura e antese, e da antese até a maturação - as temperaturas médias foram, respectivamente, 22,4°C e 22,9°C.

A temperatura máxima absoluta do período ocorreu logo após a emergência (31,8°C), enquanto a temperatura mínima (14,4°C) foi registrada quando as plantas se encontravam em fase final de maturação, aos 135 DAS.

Logo após a semeadura, as temperaturas médias registradas foram altas, em média 23,1°C, o que corroborou para que as plântulas emergissem após 7 dias da semeadura.

Figura 9 – Evolução da temperatura média durante o ciclo da cultura, e temperaturas médias dos diferentes estádios fenológicos: da semeadura até a antese e da antese até a maturação (°C) (Planaltina-DF, 1988-1989)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração do modelo LINTUL para a cultura de soja

4.1.1 Soma térmica (GDEM, GD1, GD2, °C.d)

Com base nas datas de semeadura, emergência, antese e maturação, foram calculadas as somas térmicas (°C.d) características de cada fase, com base na eq.(1), considerando-se como temperatura basal 10°C.

Entre a semeadura e emergência foram necessários 80°C.d (GDEM). Boons-Prins et al. (1993) registraram 100°C.d da semeadura à emergência de soja cultivada na França, considerando a temperatura basal de 6°C.

Para as fases seguintes, a soma térmica registrada foi de 790°C.d e 935°C.d, respectivamente entre emergência e antese (GD1) e entre a antese e a maturação (GD2). Boons-Prins et al. (1993), registraram 700°C.d e 1000°C.d para alcançar GD1 e GD2, respectivamente, enquanto Verna et al. (2007) relataram 638°C.d e 1336°C.d para os mesmo períodos. Tais diferenças são embasadas nos diferentes ciclos de maturação, regiões distintas de cultivo e a adoção de diferentes valores de temperatura basal.

4.1.2 Área foliar específica (AFE, m².g⁻¹) e índice de área foliar inicial (IAFi, m².m⁻²)

O sucesso na estimação do modelo LINTUL depende grandemente do cálculo preciso da área foliar. Conforme visto no item 3.1.2, um método flexível e amplamente aplicado a muitas culturas é a simulação da área foliar baseada no incremento de matéria seca da folha (MSf, g.m⁻²) e na área foliar específica (AFE, m².g⁻¹).

Portanto, a AFE, presumida como constante no modelo, foi calculada usando a inclinação entre o índice de área foliar (IAF, m².m⁻²), e a matéria seca das folhas verdes (MSf, g.m⁻²) obtidas no experimento de campo durante o período vegetativo. O valor da AFE adotado no modelo representa o valor médio do período vegetativo (0,036 m².g⁻¹) apresentado a seguir.

Tabela 2 – Área Foliar Específica (AFE, $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$) da variedade Savana durante o crescimento vegetativo

Semanas após emergência	IAF	Massa de matéria seca (MMS)		AFE
	$\text{m}^2(\text{folha}).\text{m}^{-2}(\text{solo})$	$\text{g. p}^{-1} *$	$\text{g. m}^{-2} *$	$\text{m}^2(\text{folha}).\text{g}^{-1}(\text{folha})$
2	0,48	0,4	14,1	-
4	0,98	0,8	28,0	0,036
6	2,08	1,7	59,5	0,035
8	3,71	2,9	101,5	0,039

* Estande = 35 plantas m^{-2} g.p^{-1} = g. por planta

Estudos similares conduzidos por Lugg e Sinclair (1979), relataram uma AFE de $0,033 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ para a folha de soja em R1, enquanto Boons-Prins et al. (1993) e Santos et al. (2003), encontraram resultados semelhantes, $0,025 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ e $0,029 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$, respectivamente, antes da floração.

Em relação ao índice de área foliar inicial na emergência (IAFi, $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$), foi calculado para a variedade cultivada Savana, através de regressão linear simples, o valor de $0,017 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$, resultado semelhante comparado a $0,0163 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ encontrado por Boons-Prins (1993) e $0,012 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ reportado por Sinclair (1986).

4.1.3 IAF crítico para auto-sombreamento das folhas (IAFcr, $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$)

Shibles e Werber (1965) descreveram para a soja que a taxa de produção de biomassa aumenta com o aumento da área foliar até determinado valor máximo, que corresponde a 95% da radiação incidente interceptada. Este valor está relacionado a uma IAF ao redor de $5,0 (\text{m}^2.\text{m}^{-2})$, e não muda com um aumento adicional na área da folha (PEREIRA, 2002; SHIBLES et al., 1987). Isto contrasta com um IAF ‘ótimo’, onde a taxa de produção de matéria seca alcança um máximo e decresce como um maior incremento na área foliar.

Entretanto, IAF maior do que $5,0 (\text{m}^2.\text{m}^{-2})$ pode ocorrer em inúmeras variedades cultivadas, principalmente nos de ciclos de maturação tardia, como na variedade cultivada Savana. Enquanto o excesso de IAF não é prejudicial a produtividade em termos IAF ‘ótimo’, ele sugere que a fotossíntese está sendo usada ineficientemente (SHIBLES; WERBER, 1966).

A problemática sobre a área foliar acima da qual há auto-sombreamento é muito complexa, pois diferentes cultivares têm diferentes tamanhos, formas e desenvolvimento do dossel. Dessa maneira, este valor ‘prejudicial’ exato depende da variedade cultivada, intensidade luminosa, forma e ângulo da folha, por exemplo.

No desenvolvimento do dossel, folhas jovens emergem e se desenvolvem no alto, em um ambiente de alta radiação, e então uma nova folha se desenvolve, e elas se tornam sombreadas por uma fração progressivamente maior de tempo (BUNCE, 1986). Esta progressão de um ambiente de alta radiação para um sombreado, é comumente refletida na capacidade de fotossíntese das folhas. De acordo com Du et al. (1988) as taxas fotossintéticas das folhas do dossel aumentam conforme a área da folha se desenvolve, alcança um pico próximo a floração (R1) e início do enchimento da vagem (R3), e diminuem durante os estádios finais de desenvolvimento. A atividade fotossintética das folhas individualmente diminui com o sombreamento do dossel. Muchow (1985) e Meyers et al. (1991b) também relataram um aumento na produção de biomassa até os estádios R1 e R2. Após a floração, um sombreamento gradual das folhas e subsequente senescência foram associados à redução na iluminação (WELLS, 1991).

A Figura 10 mostra o padrão do IAF da variedade cultivada Savana em função do número de dias após a emergência (DAE,d). Como um cultivar de maturação tardia, o Savana atingiu o máximo IAF a 6,9 ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) ou seja, nível mais alto comparado aos ciclos de maturidade precoce, que normalmente atingem 5,0 ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) como IAF máximo.

Com altos valores de IAF, o sombreamento mútuo de folhas mais baixas normalmente se torna um fator limitante. Chang (1981) relatou que com IAF maior que 6,0 ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) há sombreamento mútuo, fotossíntese ineficiente e conseqüentemente baixa produtividade potencial. Resultados similares foram registrados por Bunce (1988), estudando o sombreamento mútuo das folhas de soja e as diferenças na capacidade fotossintética de diferentes cultivares.

Figura 10 – Índice de área foliar (IAF, m².m⁻²) em função do número de dias após a emergência (DAE,d) – cultivar Savana

4.1.4 Coeficientes de partição de biomassa

A distribuição da matéria seca é fortemente relacionada ao desenvolvimento da cultura, na medida em que seus órgãos são formados durante os estádios de desenvolvimento de seu ciclo de vida, marcando a formação das raízes, hastes e folhas no estágio vegetativo, seguidos pela floração, vagem e grãos no estágio reprodutivo. A ordem de aparição dos vários órgãos é uma característica genética, e é quase independente de circunstâncias externas. O momento e taxa dessa aparição, entretanto, depende das condições ambientais e é altamente variável.

A metodologia utilizada para analisar os padrões de distribuição observados no experimento de campo foi o aumento da matéria seca dos diversos órgãos da planta em relação ao aumento da matéria seca total da planta. Os fatores de distribuição foram calculados para períodos entre duas colheitas consecutivas, a cada duas semanas. A partir destes valores parciais, o aumento na matéria seca total foi obtido, e destes números foi calculada a fração alocada para cada órgão em cada período (Tabela 3).

Aproximadamente duas semanas após a antese, a translocação de fotoassimilados foi destinada ao desenvolvimento dos grãos. No modelo LINTUL-soja presume-se que, deste momento em diante, 100% do total dos fotoassimilados são destinados aos grãos.

Tabela 3 – Fração de matéria seca alocada nas diferentes estruturas da planta em função do estágio de desenvolvimento (ED)

ED	DAE	raízes		folhas		hastes		vagens + grãos		TOTAL
		g.p ⁻¹	fração	g.p ⁻¹	fração	g.p ⁻¹	fração	g.p ⁻¹	fração	
0.10	7	0.02	0.20	0.07	0.69	0.01	0.11			0.10
0.21	14	0.08	0.18	0.30	0.67	0.07	0.16			0.45
0.33	21	0.13	0.15	0.58	0.67	0.15	0.17			0.86
0.48	28	0.20	0.15	0.80	0.62	0.30	0.23			1.30
0.58	35	0.35	0.16	1.25	0.58	0.55	0.26			2.15
0.69	42	0.50	0.17	1.70	0.57	0.80	0.27			3.00
0.79	49	0.65	0.16	2.30	0.55	1.20	0.29			4.15
0.90	56	0.80	0.15	2.90	0.55	1.60	0.30			5.30
1.00	63	0.95	0.12	4.30	0.54	2.70	0.34			7.95
1.08	70	1.10	0.10	5.70	0.54	3.80	0.36			10.60
1.17	77	1.15	0.10	6.15	0.52	4.40	0.37	0.10	0.01	11.80
1.25	84	1.20	0.09	6.60	0.50	5.00	0.38	0.40	0.03	13.20

* A fração corresponde ao coeficiente de partição a ser usado no modelo

A precisão de uma observação individual não é muito alta, no entanto as frações relatadas até a antese estão de acordo com a literatura, e dessa forma serão usadas no modelo.

4.1.5 Índice de área foliar (IAFju, m².m⁻²); taxa relativa de crescimento (cr_{exp}, °C.d)⁻¹ e soma térmica (GDJU, °C.d), durante a fase juvenil

Como mencionado no item 3.1.2, em condições ideais de desenvolvimento o estágio V1 é alcançado entre 10 e 15 dias após a emergência (GOMES, 2007). Como este estágio não foi registrado no experimento conduzido em Planaltina, uma interpolação linear foi usada na figura 10, baseada na escala de desenvolvimento de Fehr e Caviness (Tabela 4). Foi assumido que o estágio V1 ocorreu no décimo primeiro dia após a emergência. A interpolação linear determinou IAFju como 0,75 (m².m⁻²) em V1, o que corresponde ao acúmulo de 150°C.d (GDJ).

Tabela 4 – Duração (d) do período e suas variações entre os estádios inicial e final de desenvolvimento da cultivar de soja segundo a classificação de Fehr e Caviness (1977)

Esdádios inicial e final de desenvolvimento	Duração (d)	Variação na duração (d)		
Fase vegetativa				
Semeadura-VE	10	5	-	15
VE-VC	5	3	-	10
VC-V1	5	3	-	10
V1-V2	5	3	-	10
V2-V3	5	3	-	8
V3-V4	5	3	-	8
V4-V5	5	3	-	8
V5-V6	3	2	-	5
Acima de V6	3	2	-	5
Fase reprodutiva				
R1-R2	3	0	-	7
R2-R3	10	5	-	15
R3-R4	9	5	-	15
R4-R5	9	4	-	26
R5-R6	15	11	-	20
R6-R7	18	9	-	30
R7-R8	9	7	-	18

A taxa de crescimento relativo do IAF durante esta fase ($cr_{exp}, (^{\circ}C.d)^{-1}$), foi então calculada através da taxa de desenvolvimento da cultura (d^{-1}), obtida pelo inverso do período entre a emergência até o estágio V1, dividido pela temperatura efetiva diária ($^{\circ}C$), de modo a obter CR_{exp} em $(^{\circ}C.d)^{-1}$. O valor obtido foi $0,010 (^{\circ}C.d)^{-1}$.

4.1.6 Coeficiente de extinção luminosa ($k, m^2 (solo).m^{-2}(folha)$)

O coeficiente de extinção luminosa (k), mostra a fração de radiação atenuada ao longo do dossel vegetativo, devido à menor transmissividade luminosa.

A soja possui folhas com distribuição angular esférica, na qual a luz transmitida permite que camadas inferiores de folhas contribuam para o total de fotoassimilados produzidos. O valor de k para a soja vai de 0,6 a 0,8 sob intensidades luminosas “normais”. Cultivos com folhas mais verticais, têm menores valores de k (0,3-0,5), e cultivos com folhas horizontais apresentam maiores valores (0,7-1,0) (SAEKI, 1960), considerando uma média de todo o ciclo de vida.

Schoffel e Volpe (2001) e Pereira (2002) indicaram o valor ótimo do IAF para interceptar 95% da radiação como sendo ao redor de 3,9, com o coeficiente de extinção luminosa (k) aproximadamente a 0,72, com uma relação linear entre a RFA interceptada e a produção de biomassa. Resultados similares foram encontrados por Azam-Ali et al. (1994), estudando k para diferentes variedades de soja, registrando-o entre 0,45-0,96. Procopio et al. (2003), relataram k em diferentes momentos do ciclo de vida: antes da floração (0,52) e após a floração (0,93). Muitos outros pesquisadores estudaram o padrão de k para a soja, como apresentado na Tabela 5, mas para a proposta do presente estudo, um único valor de k de 0,7 representa o padrão médio para todo o ciclo de vida da cultura de, e mostra-se razoável baseado na maior parte dos estudos considerando condições ótimas de cultivo.

Tabela 5 - Coeficiente de extinção luminosa k ($m^2(\text{solo}).m^{-2}(\text{folha})$) obtidos na literatura

Valores de K	Fonte
0,45 – 0,96	Azam-Ali et al.,(1994)
0,48	Spaeth et al., (1987)
0,52-0,93	Procopio et al., (2003)
0,5	Boons-Prins et al., (1993)
0,6	Sinclair, (1986)
0,72	Pereira (2002), Schoffel e Volpe, (2001)
0,75 – 0,99	Confalone, (1999)

4.1.7 Eficiência no uso da radiação (EUR, $g.MJ^{-1}$)

Uma das abordagens mais importantes e essenciais para entender o crescimento e produtividade de um cultivo é a eficiência no uso da radiação (EUR, $g.MJ^{-1}$). Para uma dada espécie, a EUR é tida como constante, na ausência de limitações devido ao déficit hídrico, nutrição inadequada e pragas e doenças (MONTEITH; ELSTON, 1983).

Muchow (1993) e Leadley et al. (1990) encontraram para a soja uma EUR decrescente apenas próxima ao alcance da biomassa máxima da vagem, o que estava associada a mobilização do nitrogênio da folha para o grão, e também com a perda de biomassa pela senescência da folha. Na soja, a EUR tem se mostrado dependente da concentração de N nas folhas (SINCLAIR; HORIE, 1989), e desta maneira, tanto a acumulação de N pela planta quanto sua divisão entra as

folhas são importantes na determinação da produtividade. A EUR também diminui com o déficit de água no solo e baixas temperaturas, uma vez que ambas têm forte influência na taxa de fotossíntese da folha.

Foi descoberto que a EUR varia entre espécies como resultado de diferenças na capacidade fotossintética, e pelos componentes bioquímicos do produto da planta. A soja – por conter altos teores de proteínas e lipídeos – foi calculada como tendo menor EUR a taxas fotossintéticas equivalentes do que culturas de cereais que contém muito menos proteínas e lipídeos. A EUR pode também mudar com o estágio de crescimento da planta (ROCHETTE et al., 1996) e práticas de manejo de campo, como a densidade de semeadura. A própria radiação varia entre locais em termos de intensidade ou quantidade de radiação difusa, que contém maior RFA que a direta. Um aumento na fração do componente de luz difusa na radiação total resulta em um aumento na produtividade.

Sinclair e Muchow (1999) indicaram algumas razões para explicar as variações na estimativa da EUR: (i) radiação expressa com base na radiação total diária ou com base na RFA (50% da radiação total diária); (ii) algumas são expressas como radiação absorvida enquanto outras, radiação interceptada – isto pode gerar uma diferença de 5-15%; (iii) algumas se baseiam na produção líquida de matéria seca da planta, descontada a raiz, enquanto outras na produção total de matéria seca (raízes podem representar até 15% da produção total de biomassa); (iv) algumas se baseiam em diferenças entre duas amostragens distintas em diferentes estádios do crescimento da cultura, e estão sujeitas a muitos erros de amostragem quando comparadas àquelas baseadas na inclinação ajustada de muitas amostragens de crescimento da cultura.

A Tabela 6 apresenta uma revisão das principais pesquisas conduzidas sobre EUR em soja. Devido as razões mencionadas acima, elas foram todas convertidas à mesma unidade: RFA interceptada. Variações na literatura foram atribuídas a prováveis diferenças da localização e variedade de soja. Com base na literatura, será usado no modelo LINTUL-soja $1,8 \text{ g.MJ}^{-1}$ como valor de EUR – média dos principais estudos conduzidos em situação de ótimo desenvolvimento da cultura.

As parametrizações quanto ao fotoperíodo e temperaturas limítrofes já foram abordados no item 3.1.1

Tabela 6 - Eficiência no uso da radiação (EUR, g.MJ⁻¹) obtidos na literatura

Valores reportados de EUR na literatura	Fonte	Tipo de radiação	Ajuste para RFAint	Parte da planta analisada	Observações	EUR convertida para RFAint
0,66	Sinclair e Shiraiwa, (1993)	Total	1.30		diferenças reportadas entre cultivares	1.30
1,15			2.30			2.30
0,86	Leadley et al.,(1990)	Total	1,72	Aérea	valores decaem com o aumento do O ₂	1,72
0,86	Muchow et.al,(1993)	Total	1,72	Aérea		1,72
1,37	Confalone,(1998)	RFAint	-	Aérea	Para período vegetativo, florescimento e enchimento	1,37
1,38			-		de grãos, sob condições ótimas de desenvolvimento	1,38
1,36			-		experimento em áreas de baixa-latidade	1,36
1,89	Wang et al.,(2000)	RFAint	1,89	Aérea	considerou a RFA interceptada como sendo	1,89
2,14			1,82	Total	45% da radiação solar	1,82
0.97	Board et al.,(1994)	Total	1.93	Aérea		1.93
0.89	Pengelly et al.,(1999)	Total	1.78	Aérea		1.78
2.34	Daughtry et al.,(1992)	RFAabs	2.21		useando sensoriamento remoto	2.21
2.04	Rochette et al.,(1995)	RFAint	2.04	Aérea	Pouca variação na EUR para IAF>2	2.04
2.09			1.78	Total		1.78
2.28	Santos et al.,(2003)	RFAint	1.94	Total	Baixa-latidade e produtividade potencial	1.94
2.53			2.15		medição antes e depois do florescimento	2.15

RFAinterceptada corresponde = 50% da radiação solar

RFAabsorvida corresponde a 0,943 da interceptada (Daughtry et al., 1992)

Raízes correspondem à 15% do total da matéria seca

4.2 Resultados da calibração do modelo LINTUL-soja

Os parágrafos a seguir apresentam os principais resultados das simulações realizadas pelo modelo LINTUL-soja, com base nas adaptações dos parâmetros e escolha de suas ordens de grandeza. O objetivo desta discussão é analisar individualmente a resposta dos principais componentes que afetam a cultura, no que diz respeito ao desenvolvimento fenológico e simulação de área foliar. Para análise efetiva de rendimento é necessário, contudo, estudo detalhado das combinações dos parâmetros em experimento independente (item 4.3).

4.2.1 Desenvolvimento fenológico

A Figura 11 mostra a simulação feita pelo modelo LINTUL-soja em relação ao desenvolvimento fenológico da cultura (DF), da emergência até a maturação, como função da soma térmica (GD, °C.d). Tanto DF quanto GD indicam o mesmo momento no ciclo de desenvolvimento da cultura.

Figura 11 – Evolução na escala de desenvolvimento fenológico (DF) variedade cultivada Savana em função do acúmulo de graus-dia, da emergência até a maturação, simulado pelo modelo LINTUL-soja

O ciclo total de desenvolvimento da variedade Savana foi estimado corretamente pelo modelo em 144 dias, a contar pela data da semeadura. O período compreendido entre a semeadura e emergência foi de 7 dias, assim como transcorreram 64 dias e 73 dias entre a emergência e antese e entre esta e a maturação, respectivamente.

O desenvolvimento fenológico foi calculado integrando-se a sua taxa de alteração ao longo do tempo (TDF, d^{-1}), obtida pela razão entre a soma térmica em dado momento e a soma térmica necessária para atingir o estágio GD1 (antese) ou GD2 (maturação). Na Figura 12 pode-se observar a sutil mudança de estágio, de vegetativo para reprodutivo, no momento em que a soma térmica atingiu o valor estipulado para antese, no caso $790^{\circ}C.d$, que ocorreu no dia 383 (dias Julianos), ou 64 dias após a emergência. Para esta variedade cultivada, o período reprodutivo é maior do que o vegetativo, portanto, a taxa de desenvolvimento no segundo período é menor.

Figura 12 – Taxa de alteração do desenvolvimento fenológico (TDF, d^{-1}) em função do tempo (t, dias Julianos), simulado pelo modelo LINTUL-soja

No tocante ao comprimento do dia, foi observado que durante todo o período de desenvolvimento da cultura o fotoperíodo do ambiente foi menor do que 13 horas (Figura 13), o que corresponde dizer que se a variedade cultivada não possuisse período juvenil longo (P JL), seu florescimento teria ocorrido prematuramente, ocasionando porte baixo de planta, dificultando a colheita mecanizada e gerando baixas produtividades. No modelo, quando a função para cálculo do fotoperíodo é ativada, o acúmulo de graus-dia aumenta, e a soma térmica necessária para completar cada estágio, no caso, da antese até a maturação, ocorre mais rápido.

Simulando-se o fotoperíodo crítico para indução de florescimento como 13 horas, normal para variedades sem o P JL, o ciclo total da variedade cultivada Savana foi estimado em 115 dias, 29 dias a menos do que o observado a campo, com produtividade estimada de 3.093 kg.ha^{-1} , ou 19% menor do que a real (3.800 kg.ha^{-1}). Os valores da função de sensibilidade ao fotoperíodo demonstrados no item 3.1.1 foram originados de ‘tentativas e erros’, se mostrando condizente com o desenvolvimento da variedade cultivada, em dias.

Figura 13 – Fotoperíodo (FOTOP, horas) em função do tempo (t, dias Julianos), simulado pelo modelo LINTUL-soja

4.2.2 Análise comparativa do índice de área foliar

O cálculo do índice de área foliar é provavelmente um dos fatores mais críticos na simulação de crescimento de uma cultura.

Durante o crescimento exponencial, a velocidade com que o IAF atinge seu máximo é determinada pela temperatura diária efetiva, e também pela taxa de crescimento relativo da área foliar (cr_{exp} , $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$). Maiores valores desta taxa implicam em IAF máximo em menor tempo. Nota-se, porém, que seu efeito em termos de produtividade está relacionado com outros parâmetros, como por exemplo, o limite máximo de IAF. Simulando-se o aumento de cr_{exp} dentro de limites pré-estabelecidos na literatura, e mantendo os outros parâmetros como fixos, não há ganhos em produtividade, acima do valor $0,011^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$.

Figura 14 – Índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{solo})$) ao longo dos dias após a emergência (DAE,d), em função de diferentes valores de cr_{exp} ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$), assumindo como constantes os demais parâmetros (EUR=1,8g.MJ⁻¹; IAF_{cr}=6 ($\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{solo})$); AFE=0,036 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$); k=0,7 ($\text{m}^2(\text{solo}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{folha})$)

Durante o crescimento linear, o aumento no índice de área foliar é calculado como função da área foliar específica (AFE, $\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{g}^{-1}(\text{folha})$) e da matéria seca das folhas (MSf, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), com AFE representando o custo de produção fisiológico de novas folhas.

Simulando-se variações nos valores de AFE em função do tempo (Figura 15), notamos que as diferenças nos valores do IAF são mais evidentes próximo a antese, decaindo gradualmente logo em seguida. Valores mais altos de AFE, dado os demais parâmetros constantes, significam ganhos medianos em rendimento.

Figura 15 – Índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{solo})$) ao longo dos dias após a emergência (DAE,d), em função de diferentes valores de AFE ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), assumindo como constantes os demais parâmetros ($\text{EUR}=1,8 \text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$; $\text{IAF}_{\text{cr}}=6 (\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{solo}))$; $k=0,7 (\text{m}^2(\text{solo}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{folha}))$; $\text{cr}_{\text{exp}}=0,010 (^\circ\text{C} \cdot \text{d})^{-1}$)

Como a interceptação de luz não depende somente do IAF da cultura, mas também de propriedades físicas das folhas e da estrutura do dossel, lâminas foliares mais largas e maiores, com porte adequado da planta, tendem a interceptar mais radiação solar. O coeficiente de extinção luminosa k fornece indicações sobre a capacidade da planta em interceptar a radiação. Valores maiores de k podem ser atribuídos a distribuição mais uniforme da área foliar e a arquitetura mais

plana do dossel, sendo associados, portanto, a maior interceptação da RFA e aumento de rendimento.

Figura 16 – Índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{solo})$) ao longo dos dias após a emergência (DAE,d), em função de valores de $k=0,7$ ($\text{m}^2(\text{solo}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{folha})$), assumindo como constantes os demais parâmetros ($\text{EUR}=1,8\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$; $\text{IAF}_{\text{cr}}=6$ ($\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{solo})$); $\text{AFE}=0,036$ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$); $\text{cr}_{\text{exp}}=0,010$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}^{-1}$))

A determinação de um índice máximo de área foliar está relacionada, no modelo, com o patamar limite para otimização de cálculos dos demais parâmetros.

Portanto, se valores altos de IAF significam alta capacidade fotossintetizante do dossel, há de se considerar um limite, acima do qual o aumento em área não resulta em ganho de produtividade, seja pelo auto-sombreamento das folhas ou pela máxima capacidade das mesmas em interceptar a radiação. Esses valores oscilam, em média, entre 5 e 6 ($\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{solo})$), respectivamente para o primeiro e segundo casos mencionados.

Para cálculo de senescência, o modelo LINTUL-soja utiliza o valor máximo de IAF acima do qual há sombreamento. Aumentando-se este valor no sistema, esta taxa de mortalidade é

retardada; portanto IAF alto corresponde a produção alta simulada. Porém, o modelo é falho em não considerar o limite imposto pela interceptação máxima de RFA, que ocorre quando ainda não há auto-sombreamento. Acima do valor ótimo de IAF para interceptação da radiação, um excesso da área foliar colabora para o aumento da respiração, e o balanço entre esta e a fotossíntese torna-se limitante para a eficiência da produção.

Mais importante do que altos valores de IAF, é a manutenção de valores menores porém ‘eficientes’, por um maior tempo de permanência (conceito ‘stay-green’). A manutenção do IAF entre 4,0-5,0 por ao menos 30 dias durante o final do período de floração e estabelecimento das vagens é essencial para obtenção de produtividades recordes.

Em relação à eficiência no uso da radiação solar (EUR, g.MJ^{-1}), sua curva de resposta aumenta a partir da segunda metade da fase vegetativa, mantendo-se elevada até o enchimento de grãos, quando seu crescimento é linear no tempo devido a translocação de fotoassimilados dos órgãos vegetativos para os grãos. EUR decresce com o aumento da taxa de senescência das folhas. Embora a planta apresente sombreamento, o aumento na translocação de fotoassimilados das partes vegetativas para os grãos é o principal responsável pela manutenção do crescimento linear. Apesar da translocação de fotoassimilados não ser contemplada no modelo, a EUR é tida como máxima e constante por todo o ciclo da cultura. A Figura 17 mostra o comportamento do IAF em função de diferentes valores da EUR ao longo do ciclo. Há diferenças significativas de rendimento em função do aumento da EUR.

Figura 17 – Índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{solo})$) ao longo dos dias após a emergência (DAE, d), em função de diferentes valores de EUR ($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$), assumindo como constantes os demais parâmetros ($\text{AFE}=0,036 (\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$; $\text{IAF}_{\text{cr}}=6 (\text{m}^2(\text{folha}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{solo}))$; $k=0,7 (\text{m}^2(\text{solo}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{folha}))$; $\text{cr}_{\text{exp}}=0,010 (^\circ\text{C} \cdot \text{d})^{-1}$)

4.3 Adequação do modelo

Com o objetivo de viabilizar uma comparação de comportamentos do modelo, quando em diferentes situações, foram utilizados os dados de experimento de campo conduzido pela Fundação MT, no ano safra de 2007-2008, contemplando 8 diferentes variedades cultivadas de soja, todas contendo período juvenil longo.

O experimento foi implantado na estação experimental de Sorriso, estado do Mato Grosso, Brasil (386 metros acima do nível do mar, $12^\circ 26' 05''$ S e $55^\circ 39' 02''$ W), com solo tipo Latossolo Vermelho Amarelo. O delineamento usado foi em blocos ao acaso, com 3 repetições. Cada parcela foi composta de 4 linhas de 5 metros, sendo a área útil formada pelas duas linhas centrais.

Calibrados os valores dos parâmetros k ($0,7 \text{ m}^2(\text{solo}) \cdot \text{m}^{-2}(\text{folha})$), EUR ($1,8 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$), cr_{exp} ($0,010 (^\circ\text{C} \cdot \text{d})^{-1}$) e AFE ($0,036 (\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$), foi atribuída a variação de 10% a mais e a menos em cada

valor, e as respostas de suas combinações foram comparadas aos resultados de produtividade obtidos pelo experimento. A Tabela 7 contém as datas de semeadura, antese e maturação, bem como soma térmica necessária para cada estágio, e a produtividade obtida. Demais parâmetros de entrada do modelo foram mantidos constantes. A emergência ocorreu 7 dias após a semeadura.

Os sistemas estatísticos usados foram: SPSS for Windows – Statistical Package for Social Sciences, versão 7.5.1; e UNISTAT - Statistical Package for Windows, Versão 5.0.

Tabela 7: Variedades cultivadas e respectivas datas de semeadura, antese e maturação, com correspondentes valores de soma térmica, em °C.d; grupo de maturação e produtividade observada (kg.ha⁻¹) em Sorriso-MT, ano safra 2007-2008.

Variedade	Data da semeadura	GDEM °C.d	Data da Antese	GD1 °C.d	Data da Maturação	GD2 °C.d	G.M.	Produtividade (kg.ha ⁻¹)
Linha6-62.435/2	01/11/2007	88	12/12/2007	607	29/02/2008	1229	8,4	4.176
Linha6-41.834/1	01/11/2007	88	12/12/2007	607	02/03/2008	1259	8,5	4.038
Linha4-67.053/3	01/11/2007	88	17/12/2007	694	01/03/2008	1157	8,6	4.140
Linha6-51.680/2	01/11/2007	88	17/12/2007	694	01/03/2008	1157	8,6	4.092
Linha6-52.693/1	01/11/2007	88	17/12/2007	694	29/02/2008	1142	8,4	4.692
Linha6-52.685/1	01/11/2007	88	17/12/2007	694	29/02/2008	1142	8,4	4.464
Linha6-52.994/1	01/11/2007	88	17/12/2007	694	28/02/2008	1126	8,3	4.560
Linha6-41.720/1	01/11/2007	88	17/12/2007	694	28/02/2008	1126	8,3	4.350

Para o estudo da adequação do modelo LINTUL-soja para estimativa de produtividade potencial, adotou-se as seguintes estratégias: (i) cálculo das diferenças entre as 8 produtividades observadas e as ajustadas via modelo, para todos os casos; (ii) construção da matriz de similaridade, a fim de escolher os fatores mais correlacionados com as diferenças; (iii) tomando como base as diferenças da primeira variedade cultivada, foram construídas regressões lineares com as outras 7 variedades, para verificação da eficiência do modelo; (iv) teste de heterogeneidade dos coeficientes de regressão para os ‘modelos’ obtidos nos 8 casos.

O uso das diferenças em cada combinação de fatores, entre a produção efetivamente observada a campo e a produção ajustada através do modelo, eliminou o desconforto de conviver com variâncias nulas na execução dos testes de hipóteses. Tais diferenças apresentaram, ainda, a vantagem de apontar, mesmo que informalmente, a combinação de fatores que levou à menor distância entre a produção observada e a produção estimada. Assim, considerando-se as diferenças, foram percorridas três fases:

Fase 1 – Matriz de similaridade

Com base em LEBART et al (1995), construiu-se a matriz de similaridades visando identificar os fatores mais correlacionados aos vetores das diferenças. Conforme pode ser observado na Tabela 8, os parâmetros EUR, k e cr_{exp} apresentaram as maiores similaridades e, portanto, foram os escolhidos para permanecer no modelo. O estudo detalhado das matrizes encontra-se no ANEXO 1.

Tabela 8: Resumo dos valores das matrizes de similaridade por variedade cultivada de soja.

Variedades	K	EUR	cr_{exp}	IAFcr	AFE
Linha6-62.435/2	0,397	0,840	0,310	0,000	0,191
Linha6-41.834/1	0,391	0,842	0,311	-0,004	0,190
Linha4-67.053/3	0,334	0,853	0,231	-0,022	0,169
Linha6-51.680/2	0,357	0,877	0,254	0,000	0,191
Linha6-52.693/1	0,357	0,877	0,255	0,000	0,191
Linha6-52.685/1	0,357	0,877	0,255	0,000	0,192
Linha6-52.994/1	0,358	0,876	0,256	0,000	0,192
Linha6-41.720/1	0,358	0,876	0,256	0,000	0,192

Quando o modelo LINTUL-soja foi ajustado para cada variedade, ficaram caracterizadas as combinações dos parâmetros que levaram às menores diferenças entre produtividades ajustadas e produtividades observadas (Tabela 9). Verifica-se que os três valores adotados para k não interferiram nas diferenças.

Tabela 9: Menores diferenças entre produtividade ajustadas via modelo e produtividade observada a campo

Local	Diferenças					
	(kg)	EUR	cr_{exp}		K	
Linha6-62.435/2	9	1,98	0,009	0,63	0,70	0,77
Linha6-41.834/1	2	1,80	0,011	0,63	0,70	0,77
Linha4-67.053/3	28	1,80	0,010	0,63	0,70	0,77
Linha6-51.680/2	13	1,80	0,011	0,63	0,70	0,77
Linha6-52.693/1	6	1,98	0,010	0,63	0,70	0,77
Linha6-52.685/1	12	1,98	0,009	0,63	0,70	0,77
Linha6-52.994/1	20	1,98	0,010	0,63	0,70	0,77
Linha6-41.720/1	18	1,98	0,010	0,63	0,70	0,77

Fase 2 – Regressões Lineares

Tomando-se ao acaso, como referência, a produtividade da variedade Linha 6-62.435/2, foram construídas regressões lineares com as outras 7 produtividades, a fim de verificar se o modelo foi igualmente eficiente para todas elas.

Conforme resultados da Tabela 10, as regressões lineares entre a variedade Linha 6-62.435/2 e as demais, apresentaram excelentes coeficientes de determinação, variando entre 0.98 e 1.00. Em outras palavras, as regressões lineares entre os vetores das diferenças inerentes às sete variedades e o vetor das diferenças da variedade Linha 6-62.435/2, revelaram um excelente ajuste evidenciando que o LINTUL-soja tendeu a ajustar de maneira semelhante as produções dessas oito variedades.

Tabela 10: Resultado das regressões lineares entre a variedade Linha6-62.435/2 e as demais variedades cultivadas

	Intercepto	Inclinação	R ²
Linha6-41.834/1	261,6	1,03	1
Linha4-67.053/3	100,5	0,94	0,98
Linha6-51.680/2	144,73	0,97	0,99
Linha6-52.693/1	-518,26	0,93	0,99
Linha6-52.685/1	-290,23	0,96	1
Linha6-52.994/1	-450,61	0,95	1
Linha6-41.720/1	-240,61	0,95	1

Fase 3 – Teste da heterogeneidade dos coeficientes de regressão linear.

Um critério alternativo foi utilizado para a checagem dos resultados anteriores. Construiu-se um vetor com as $3^3 = 27$ combinações de valores atribuídos aos parâmetros que restaram no modelo. Esse vetor foi tomado como ‘variável independente’ e relacionado através de regressões lineares com os 8 vetores de diferenças observadas no ajuste, via LINTUL-soja, das produtividades das 8 variedades cultivadas.

Como resultado, o teste dos coeficientes de inclinação (Tabela 11), revelou excelente performance, ou seja, para a tendência de acréscimo e decréscimo da produtividade com a variação dos valores dos parâmetros. Por outro lado, o teste de heterogeneidade dos interceptos (Tabela 12) revelou diferenças significativas.

Tabela 11: Teste de heterogeneidade das inclinações

Variedade	Inclinação	
	Valor	Significância
Linha6-41.834/1	-49,16	a
Linha6-51.680/2	-49,05	a
Linha6-52.685/1	-48,33	a
Linha6-52.693/1	-48,33	a
Linha4-67.053/3	-48,29	a
Linha6-62.435/2	-47,61	a
Linha6-52.994/1	-47,58	a
Linha6-41.720/1	-47,58	a

Tabela 12: Teste de heterogeneidade dos interceptos

Variedade	Inclinação	
	Valor	Significância
Linha6-52.693/1	-195,53	a
Linha6-52.994/1	-125,37	ab
Linha6-52.685/1	32,47	ab
Linha6-41.720/1	84,63	bc
Linha6-62.435/2	315,42	d
Linha4-67.053/3	426,17	e
Linha6-51.680/2	464,96	e
Linha6-41.834/1	570,92	f

Dado que o intercepto pode ser entendido como o lugar onde a reta corta o eixo Y, tal ocorrência parece evidenciar o fato de que, em relação à soja, algum outro parâmetro que considere a produtividade deva ser inserido no modelo, como, por exemplo, o efeito negativo da respiração após o IAF exceder determinado patamar.

4.4 Comparativo de resposta: LINTUL-soja (FST) e LINTUL-VB

O modelo LINTUL utiliza a linguagem de programação FST (Fortran Simulation Translator) e seu correspondente software compatível ao Windows FSTWin, adaptado em 2001 pela Universidade de Wageningen, com a finalidade de simplificar a linguagem de programação, tornando-a mais poderosa do que a antiga linguagem FORTRAN ('FORMula TRANslation'). Sua sintaxe se baseou na usada pelo CSMP (Continuous System Modeling Program, IBM, 1975), necessitando o compilador Compaq Visual Fortran.

Com fácil interface e relativa simplicidade na programação, tal linguagem foi amplamente difundida no meio acadêmico europeu – berço da modelagem. O FST permite a criação de programas que primam pela velocidade de execução. Daí reside seu uso em aplicações científicas computacionalmente intensivas como meteorologia, física, astronomia, geofísica, engenharia e economia. Contudo, sua linguagem de programação é considerada, hoje em dia, arcaica e ultrapassada por muitos programadores que aprenderam linguagens mais modernas. Apesar de permitir que dados sejam copiados para planilhas, por exemplo, em Excel, o sistema é incapaz de gerá-las diretamente, tornando o processo de calibragem relativamente lento, manual e susceptível a erros. Considerando-se que a modelagem é uma ferramenta relativamente desconhecida no Brasil, pesquisadores e profissionais que atuam com esta tecnologia procuram aprender linguagens mais novas, de comprovada simplicidade e que possam também serem difundidas no meio acadêmico. Neste tocante, destaca-se a linguagem de interface gráfica Visual Basic, desenvolvida pela Microsoft e popularmente difundida em nosso país.

Dada a necessidade de validar os cálculos simulados pelo modelo LINTUL-soja, bem como proporcionar a novos usuários uma opção de 'simulação de processos', foi replicada a rotina de cálculo do LINTUL-soja na linguagem Visual Basic.

As linguagens de programação encontram-se nos ANEXOS 2 e 3, e os principais resultados são demonstrados a seguir, em função dos dias após semeadura (DAS, d). Eventuais diferenças (erro relativo máximo e mínimo) entre as duas linguagens são atribuídas ao tipo e limitação do processador usado por cada software.

Para presente simulação, adotou-se valores aleatórios de GD1 e GD2 como sendo 819 °C.d e 1093°C.d, respectivamente. Os demais parâmetros foram mantidos constantes.

Figura 18 – Simulação do acúmulo de graus-dia (GD, °C.d) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)

Figura 19 – Simulação do desenvolvimento fenológico (DF) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)

Figura 20 – Simulação do índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)

Figura 21 – Simulação da taxa de acúmulo de massa de matéria seca total (TAMS, $\text{g}.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)

Figura 22 – Simulação da taxa de senescência foliar (TSF, g.m⁻².d⁻¹) (A) e da taxa relativa de mortalidade das folhas (TRM, d⁻¹) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)

Figura 23 – Simulação em Visual Basic do acúmulo de massa de matéria seca das folhas verdes (MSfv, g.m⁻²) (A) e das folhas secas (MSfs, g.m⁻²) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)

Figura 24 – Simulação da taxa de acúmulo de massa de matéria seca das raízes (TMSr, g.m⁻².d⁻¹) (A) e do acúmulo de massa de matéria seca das raízes (MSr, g.m⁻²) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)

Figura 25 – Simulação da taxa de acúmulo de massa de matéria seca das hastes (TMSH, g.m⁻².d⁻¹) (A) e do acúmulo de massa de matéria seca das hastes (MSH, g.m⁻²) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)

Figura 26 – Simulação da taxa de acúmulo de massa de matéria seca nos grãos (TMSg, g.m⁻².d⁻¹) (A) e do acúmulo de massa de matéria seca nos grãos (MSg, g.m⁻²) (B) realizado pelo LINTUL-VB, e respectivos erros relativos máximo e mínimo (%), quando comparados a simulação LINTUL-soja (FST)

4.5 Considerações finais

Os modelos propostos para a estimação de produtividade potencial são justificáveis, tratando-se de importante ferramenta na análise dos componentes de crescimento, desenvolvimento e produtividade da planta. Através destes modelos é possível, portanto, criar estratégias para a otimização da produção, como a sugestão de índices ótimos de área foliar ou estrutura de copa, capazes de maximizar o processo produtivo. No caso específico da soja cultivada em baixas latitudes, esta ferramenta mostrou-se eficiente quanto a simulação de ciclo e predição de crescimento com ou sem gene de longa juvenilidade.

O modelo LINTUL é bastante simples quanto ao número de seus parâmetros, no entanto, a acuracidade dos mesmos é fator tão restritivo quanto o conhecimento de seus processos. Dada a natureza variável do processo de produção, é essencial uma abordagem que envolva variáveis, parâmetros e constantes matemáticas, juntamente com componentes aleatórios (incertezas), ou seja, é importante abordar o processo não somente de forma determinística, mas principalmente estocástica.

O índice de área foliar máximo em relação à interceptação de radiação fotossinteticamente ativa deve ser melhor estudado – via experimentos – e incorporado no modelo através, por exemplo, de funções que deplecionem a massa de matéria seca total produzida em função do aumento da respiração do dossel. Estes experimentos devem ser capazes de avaliar a eficiência da interceptação de RFA, levando-se em conta diferentes variedades cultivadas, com diferentes estruturas de copa, onde parâmetros como o IAF e k , por exemplo, possam ser extensivamente avaliados.

5 CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos, e do que foi discutido, pode-se concluir que:

(i) parametrização:

Os parâmetros para estimação da produtividade potencial da cultura de soja utilizando o modelo LINTUL-soja são: soma térmica entre a semeadura e emergência; emergência e fase juvenil; fase juvenil e antese; e entre a antese e a maturação da cultura ($^{\circ}\text{C.d}^{-1}$); área foliar específica (AFE, $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$); área foliar inicial e IAF crítico para sombreamento (IAFi e IAF_{cr}, $\text{m}^2(\text{folha}).\text{m}^{-2}(\text{solo})$); coeficientes de partição de massa de matéria seca para os órgãos (raízes, hastes, folhas e grãos); IAF na fase juvenil (IAFju, $\text{m}^2(\text{folha}).\text{m}^{-2}(\text{solo})$); taxa de crescimento relativo do IAF na fase juvenil ($\text{cr}_{\text{exp}}, ^{\circ}\text{C.d}^{-1}$); eficiência do uso da radiação (EUR, g.MJ^{-1}); coeficiente de extinção luminosa ($k, \text{m}^2(\text{solo}).\text{m}^{-2}(\text{planta})$); função temperaturas limítrofes para desenvolvimento da planta de soja e função de sensibilidade ao fotoperíodo.

(ii) calibração:

Com base nos experimentos de campo e na literatura, as variações na ordem de grandeza dos parâmetros estudados são: para k (0,45-0,99); AFE (0,025-0,036); IAFi (0,012-0,017); IAFcr (5-6); IAFju (0,75-1,0); cr_{exp} (0,010) e EUR (1,30-2,15).

Os parâmetros mais correlacionados com a produtividade potencial são: cr_{exp} , que é importante no início do crescimento da cultura pois, juntamente com a temperatura, está relacionado à velocidade de produção de área foliar; k, relacionado com a capacidade da copa em interceptar radiação e EUR, que mostra quão eficiente a planta é na conversão da radiação em biomassa.

O modelo possui excelente performance quanto a predição de tendências, com a variação nos valores dos parâmetros.

Foi observado na análise de crescimento que o modelo necessita de ajustes quanto a introdução de módulos, ou funções, que contemplem o balanço de carboidratos, dado aumento excessivo nos valores de IAF (respiração/fotossíntese). Tal fator pode ser o responsável pelas diferenças no teste de heterogeneidade dos interceptos.

São necessários experimentos de campo contemplando estudos de diferentes cultivares e seus fatores de crescimento. Dessa maneira, pode-se avaliar, por exemplo, qual o melhor IAF

necessário à máxima produtividade, auxiliando no planejamento do manejo de populações bem como a melhor definição da época de semeadura.

(iii) FST e Visual Basic

A rotina do modelo LINTUL-soja executada na linguagem FORTRAN foi replicada com sucesso para a linguagem Visual Basic, tornando este modelo de simulação de crescimento e estimação de produtividade potencial acessível a um maior número de usuários.

REFERÊNCIAS

ALEXANDROV, V.A.; HOOGENBOOM, G. Vulnerability and adaptation assessments of agricultural crops under climate change in the southeastern USA. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 67, n. 1/2, p. 45-63, 2000.

ALVAREZ FILHO, A. Botânica e desenvolvimento. In: SANTOS, O.S. (Coord.). **A cultura da Soja**. Rio de Janeiro: Globo, 1988. p. 27-35.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T.; HATFIELD, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat, **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 300-306, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS (ABIOVE). **Sustainable soy production strategic actions**. Set.2007 Disponível em: <<http://abiove.com.br>>. Acesso em: 20 mar. 2008.

AZAM-ALI, S.N.; CROUT, N.M.J; BRADLEY, R.G. Perspectives in modeling resource capture by crops. In: MONTEITH, J.L.; SCOTT, R.K.; UNSWORTH, M.H. (Ed.). **Resource capture by crops**. Nottingham: Nottingham University Press, 1994. p. 125–148.

BEAN, B.; MILLER, T. **Soybean growth staging**. Texas Agricultural Extension Service, 1998. 23 p. Disponível em: <<http://soilcrop.tamu.edu/publications/pubs/scs1998-23.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2008.

BENINCASA, M.M.P. **Análise de crescimento de plantas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 43 p.

BERNARD, R.L. Two genes affecting stem termination in soybean. **Crop Science**, Madison, v. 12, p. 235-239, 1972.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Comércio exterior brasileiro**. Mar.2008. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 24 jun. 2008.

BOARD, J.E.; HARVILLE, B.G.; KAMAL, M. Radiation-use efficiency in relation to row spacing for late-planted soybean. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, p. 13-19, 1994.

BONETTI, L.P. Cultivares e seu melhoramento genético. In: VERNETTI, F.J. (Coord.). **Soja, genética e melhoramento**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. p. 741- 800.

BOONS-PRINS, E.R.; KONING DE, G.H.J.; VAN DIEPEN, C.A.; PENNING DE VRIES, F.W.T. **Crop-specific parameters for yield forecasting across the European Community: simulation reports**. Wageningen: CABBO-TT, 1993. (CABO-TT, 32).

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704–716, 1996.

BOUMAN, B.A.M.; VAN KEULEN, H.; VAN LAAR, H.H.; RABBINGE, R. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 52, p. 171-198, 1996.

BOURD, J.E.; HARVILLE, B.G. Explanations for greater light interception in narrow- versus Wide-row soybean. **Crop Science**, Madison, v. 32, p. 198-202, 1992.

BROWN, D.M. Soybean ecology I. Development temperature relationships from controlled environment studies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 52, n. 9, p. 493-495, 1960.

BUNCE, J.A. Measurements and modeling of photosynthesis under field conditions. **CRC Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 4, p. 47-77, 1986.

BUNCE, J.A. Mutual shading and the photosynthetic capacity of exposed leaves of field grown soybeans. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 15, p. 75-83, 1988.

BUTTERY, B.R. Effects of variation in leaf area index on growth of maize and soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 10, p. 9-13, 1970.

CAIXETA FILHO, J.V. **Pesquisa operacional**: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais. São Paulo: Atlas, 2001. 171 p.

CASAROLI, D.; FAGAN, E.B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S.P.; MANFRON, P.A.; DOURADO-NETO, D. ; VAN LIER, Q.J.; MULLER, L.; MARTIN, T.N. Solar radiation and physiologic aspects in soybean – a review. **Revista da FZVA**, Uruguiana, v. 14, p. 102-120, 2007.

CÂMARA, G.M.S. **Efeito do fotoperíodo e da temperatura no crescimento, florescimento e maturação de cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. 1991. 266 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

_____. Ecofisiologia da cultura da soja, In: SIMPÓSIO SOBRE CULTURA E PRODUTIVIDADE DA SOJA, 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1992. p. 129-142.

_____. **Soja**: tecnologia da produção. Piracicaba: O Autor, 1998. 293 p.

_____. Fenologia é ferramenta auxiliar de técnica de produção. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 3, n. 5, p.63-66. jan./jun 2006.

CAMARGO, M.B.P. **Exigências bioclimáticas e estimativa da produtividade para quatro cultivares de soja no estado de São Paulo**. 1984. 96 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

CANADÁ. Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs (OMAFRA). **Soybeans: stages of soybean leaf development**. Nov. 2002. Disponível em: <<http://www.omafra.gov.on.ca>>. Acesso em: 10 out. 2008.

CHANG, Y.Z. LAI of high-yielding cultivation in soybean. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 105, p. 157–171, 2008.

CHIPANSHI, A.C.; RIPLEY, E.A.; LAWFORD, R.G. Large-scale simulation of wheat yields in a semi-arid environment using a crop-growth model. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 59, p. 57-66, 1999.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos safra 2007/2008 - 5º relatório**. Fev. 2008. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 12 abr. 2008.

CONFALONE, A.; NAVARRO, M.D. Influência do “déficit” hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 5, n. 3, p. 195-198, 1999.

COOPER, R.L. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 82, p. 27-35, 2003.

COSTA, J.A.; MANICA, I. **Cultura da soja**. Porto Alegre: Ed. Evangraf, 1996. 233 p.
CRUZ, C.D. **Programa Genes**: versão Windows: aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa: Editora UFV, 2001. 648p

COSTA, L.C. Modelagem e simulação em agrometeorologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBA, 1997. p. 3-6.

DAUGHTRY, C.S.T.; GALLO, K.P.; GOWARD, S.N.; PRINCE, S.D.; KUSTAS, W.P. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 39, p. 141-152, 1992.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO. Irrigation Drainage Paper , 33)

DOURADO NETO, D. **Modelos fitotécnicos referentes à cultura do milho**. 1999. 229 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

DRIESSEN, P.M.; KONIJN, N.T. **Land-use systems analysis**. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1992. 230 p.

EGLI, D.B.; LEGGETT, J.E. Dry matter accumulation patterns in determinate and indeterminate soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 12, p. 220-222, 1973.

EMBRAPA. **Relatório técnico do projeto Nipo-Brasileiro de cooperação em pesquisa agrícola 1987-1992**. Brasília, 1994. 74 p.

_____. **O complexo agroindustrial da soja brasileira**. Londrina: EMBRAPA Soja, 2007. 12 p. (Circular Técnica, 43).

_____. **Sistemas e produção 12 - tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil 2008**. Londrina: EMBRAPA Soja, 2008. 282 p.

EVANS, L.T. **Crop evolution, adaptation and yield**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 500 p.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Iowa: Agricultural Experimental Station, 1977. 81 p. (Special Report).

GARNER, W.W.; ALLARD, H A. Photoperiodic response of soybeans in relation to temperature and other environmental factors. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 41, p. 719-735, 1930.

GIBSON, L.; BENSON, G. **Origin, history, and uses of soybean (*Glycine max*)**. Abr.2008. Disponível em: < http://www.agron.iastate.edu/courses/agron 212/ readings/soy_history.htm. Acesso em: 12 jun. 2008.

GOMES, A.C.S. **Efeito de diferentes estratégias de irrigação sob a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na região de Santiago, RS**. 2007. 133 p. Tese (M.S. em Irrigação) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

GRIMM, S.S.; JONES, J.W.; BOOTE, J.K.; HERZOG, D.C. Modeling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 31-38, 1994.

GRIMM, S.S.; JONES, J.W.; BOOTE, J.K.; HESKETH, J.D. Parameter estimation for predicting flowering dates of soybean cultivars. **Crop Science**, Madison, v. 33, p. 137-144, 1993.

GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H.H. **Modelling potential crop growth processes**: textbook with exercises. Amsterdam: Kluwer Academic Press, 1994. 238 p.

GUIAMET, J.J.; NAKAYAMA, F. The effects of long days upon reproductive growth in soybeans, *Glycine max*, L. Merr. cv. Williams. **Crop Science**. Madison, v. 53, p. 35-40, 1984.

GUIMARÃES, R.J. **Análise do crescimento e da quantificação de nutrientes em mudas de cafeeiro, (*Coffea arabica* L.), durante seus estádios de desenvolvimento em substrato padrão**. 1994. 113 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1994.

HARTWIG, E.E.; KIIHL, R.A.S. Identification and utilization of a delayed flowering character in soybeans for short-days conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 2, p. 145-151, 1979.

HARTWIG, E.E. Varietal development. In: CALDWELL, B.E. (Ed.). **Soybeans: improvement, production and uses**. Madison: American Society of Agronomy, 1973. p. 182-210.

HEEMST, H.D.J. van. Physiological principles. In: VAN KEULEN, H.; WOLF, J. (Ed.).

Modeling of agricultural production: weather, soils and crop. Pudoc: Wageningen, 1986. p. 13-26.

HESKETH, J.D.; MYHRE, D.L., WILLEY, C.R. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 13, p. 250-254, 1973.

HICKS, D.R.; PENDLETON, J.W.; BERNARD, R.L.; JOHNSTON, T.J. Response of soybean plant types to planting pattern. **Agronomy Journal**, Madison, v. 61, p. 290-293, 1969.

HICKS, D.R. Growth and development. In: NORMAN, A.G. (Ed.). **The soybeans: physiology, agronomy and utilization**. New York: Academic Press, 1978. p. 17-41.

HOFSTRA, G. Response of soybeans to temperature under high light intensities. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 52, p. 535-543, 1972.

HYMOWITZ, T.; HARLAN, J.R. Introduction of soybeans to North America by Samuel Bowen in 1765. **Economic Botany**, St. Louis, v. 37, p. 371-379, 1983.

HOWELL, R.W.; COLLINS, F.I. & SEDGEWICK, V.E. Respiration of soybean seeds related to weathering losses during ripening. **Agronomy Journal**, Madison, v. 51, n. 11, p. 677-679, 1959.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Brazilian biome maps**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **Area, produção e rendimento da soja – de 1997 à 2007 (LSPA)**. Mar.2008.

Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br> >. Acesso em: 15 jun. 2008

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Amazon Forest monitoring using satellite images PRODES Project**. Mar.2008. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes>>. Acesso em: 20 jun. 2008

INTERNATIONAL MONETARY FUND. **Biofuel demand pushes up food prices: international report**, oct.2007. Available website: <<http://www.imf.org>>.

ITTERSUM, M.K. van; LEFFELAAR, P.A.; KEULEN, H. van; KROPFF, M.J.; BASTIAANS, L.; GOUDRIAAN, J. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 201-234, 2003.

JEFFERS, D.L.; SHIBLES, R.M. Some effects of leaf area, solar radiation, air temperature, and variety on net photosynthesis in field-grown soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 9, p. 762-764, 1969.

JOHNSON, H.W.; BORTHWICK, H. A.; LEFFEL, R.C. Effects of photoperiod and time of planting on rates of development of the soybean in various stages of the life cycle. **Botanical Gazette**, Chicago, v. 22, p. 77-95, 1960.

JORGENSEN, S.E. Fundamentals of ecological modelling. In: _____. **Developments in environmental modeling**. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 1994. v. 19, p. 25.

KIIHL, R. A. S.; GARCIA, A. The use of the long-juvenile trait in breeding soybean cultivars. In PASCALE, A. J. In: **WORLD SOYBEAN CONFERENCE 4.**, Buenos Aires, Argentina, 1989, p. 994-1000.

KUBINS, S. Measurement of radiant energy. In: SESTAK, Z.; CATSKY, J.; JARVIS, P.G. **Plant photosynthetic production, manual of methods**. Hague: W. Junk, 1971. p. 702-765.

LACERDA, A.L.S. **Fatores que afetam a maturação e qualidade fisiológica das sementes de soja (*Glycine max* L.)**. 2007. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2007_3/maturacao/index.htm. Acesso em: 21 nov. 2008.

LEADLEY, P.W.; REYNOLDS, J.F.; FLAGLER, R.; HEAGLE, A.S. Radiation utilization efficiency and the growth of soybeans exposed to ozone: A comparative analysis. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 51, p. 293-308, 1990.

LEBART, L. ; MORINEAU, A. ; PIRON, M. **Statistique Exploratoire Multidimensionnelle**. Ed. Dunod, 1995, Paris, 438 p.

LOOMIS, R.S.; CONNOR, D.J. Development. In: _____. **Crop ecology: productivity and management in agricultural systems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 104-128.

LIU, X.; JIN, J.; WANG, G. HERBERT, S.J. Soybean yield physiology and development of high-yielding practices in Northeast China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 105, p. 157-171, 2008.

LOVENSTEIN, H.; LANTINGA, E.A.; RABBINGE, R.; VAN KEULEN, H. **Principles of production ecology**. Wageningen: Syllabus of Chair Group Theoretical Production Ecology, 1995. 121 p.

LUGG, D.G.; SINCLAIR, T.R. A survey of soybean cultivars for variability in specific leaf weight. **Crop Science**, Madison, v. 19, p. 887-892, 1979.

MAYAKI, W.C.; TEARE, I.D; STONE, L.R. Top and root growth of irrigated and non-irrigated soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 16, p. 92-94, 1976.

MAYERS, J.D.; LAWN, R.J.; BYTH, D.E. Adaption of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] to the dry season of the tropics. I. Genotypic and environmental effects on phenology. **Australian Journal of Agricultural Research**, East Melbourne, v. 42, p. 497-515, 1991a.

_____. Agronomic studies on soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) in the dry seasons of the tropics. I. Limits to yield imposed by phenology. **Australian Journal of Agricultural Research**, East Melbourne, v. 42, p. 1075-1092, 1991b.

McWILLIAMS, D.A.; BERGLUND, D.R.; ENDRES, G.J. **Soybean growth and management: quick guide**. Minnesota: North Dakota State University, University of Minnesota, 1999. 8 p.

MEINKE, H., HOCHMAN, Z. Using seasonal climate forecasts to manage dryland crops in northern Australia. In: HAMMER, G.L.; NICHOLLS, N.; MITCHELL, C. (Ed.). **Application of seasonal climate forecasting in agricultural and natural ecosystems: the Australian experience**. Amsterdam: Kluwer Academic, 2000. p. 149-165.

MICHIGAN STATE UNIVERSITY EXTENSION. **Soybean growth & development**. Set.2005. Disponível em: < <http://www.msue.msu.edu/portal/>>. Acesso em: 28 set. 2008

MOEN, T.N.; KAISER, H.M.; RIHA, S.J. Regional yield estimation using a crop simulation model: concepts, methods and validation. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 46, p. 79-92, 1994.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 9, p. 747-766, 1972.

_____. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B**, London, v. 281, p. 277-294, 1977.

_____. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agricultural and Forestry Meteorology**, Amsterdam, v. 68, p. 220- 231, 1994.

MUCHOW, R.C. An analysis of the effects of water deficits on grain legumes grown in a semi-arid tropical environment in terms of radiation interception and its efficiency of use. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 11, p. 309-323, 1985.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; PENGELLY, B.C. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 32, p. 1-6, 1993.

MUNAKATA, K. Simulation of population photosynthesis and dry matter production. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K. ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.). **Science of the rice plant**. Amsterdam: Physiology, Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. v. 2, p. 671-684.

NIELSON, C.S. Effects of photoperiod on microsporogenesis in Biloxi soybean. **Botany Gazette**, Chicago, n. 104, p. 99–106, 1942.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425 p.

PASCALE, A. J. Tipos agroclimáticos para el cultivo de la soya en la Argentina. **Revista de la Facultad de Agronomía e Veterinaria**, Buenos Aires, v.17, p.31-38, 1969.

_____. Aptitud agroecologica de la Provincia de Tucumán para el cultivo de la soja. **Revista Industrial y Agrícola de Tucumán**, Tucuman, v. 63, n. 1, p. 1-22, 1986.

PASCALE, A.J.; FLEURAT, F.; LESSARD, L.; CONAN, L. Reacción de distintas variedades de soja a los factores bioclimáticos de Buenos Aires. **Revista da Faculdade de Agronomia Veterinária de Buenos Aires**, Buenos Aires, v. 15, n. 3, p. 29-54, 1963.

PEDERSEN, P. **Soybean physiology: yield, maturity groups, and growth stages**. Iowa State University Extension, Department of Agronomy. Jul 2007. Disponível em: <www.soybeanmanagement.info>. Acesso em: 20 set. 2008

PENGELLY, B.C.; BLAMEY, F.P.C.; MUCHOW, R.C. Radiation interception and the accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 63, p. 99-112, 1999.

PENARIOL, A. Cultivares no lugar certo. **Informações Agronômicas**, POTAFOS, n.90, p.13-14, 2000.

PENNING DE VRIES, F.W.T.; JANSEN, D.M.; TEN BERGE, H.F.M.; BAKEMA, A. **Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops**. Wageningen: Pudoc, 1989. 271 p.

PEREIRA, C.R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 282p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

PESSOA, M.C.P.Y.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FERNANDES, E.N.; LIMA, M.A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Brasília: EMBRAPA, 1997. 44 p.

PROBST, A.H.; JUDD, R.W. Origin, US history and development, and world distribution. In: , CALDWELL, B. E. (Ed.). **Soybeans: improvement, production, and uses**. Madison: ASA, 1973. p. 1-15. (Agronomy Monograph ,16).

PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A. da; COSTA, L.C. Desenvolvimento folhar das culturas da soja e do feijão e de planta daninha. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 207-211, 2003.

- RADFORD, P. J. Growth analysis formulae - their use and abuse. **Crop Science**, Madison, v. 7, p. 171-175, 1967.
- RAPER, C.D. Jr.; THOMAS, J.F. Photoperiodic alteration of dry matter partitioning and seed yield in soybean. **Crop Science**, Madison, v. 18, p. 654-656, 1978.
- ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R.L.; PATTEY, E.; LESSARD, R. Instantaneous measurement of radiation and water use efficiencies of a maize crop. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 627-635, 1996.
- RODRIGUES, O.; DIDINET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; LUZ, J.S. da. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 431-437, 2001.
- SAEKI, T. Interrelationships between leaf amount, light distribution, and total photosynthesis in a plant community. **The Botanical Magazine**, London, v. 73, p. 55-63, 1960.
- SANTOS, J.B.; PROCÓPIO, S.O.; SILVA, A.A.; COSTA, L.C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 147-153, 2003.
- SBARDELOTTO, A.; LEANDRO, G.V. Escolha de cultivares de soja com base na composição química dos grãos como perspectiva para maximização dos lucros nas indústrias processadoras. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 3, p. 614-619, 2008.
- SCHNEPF, R.D.; DOHLMAN, E.; BOLLING, C. **Agriculture in Brazil and Argentina**. Washington: USDA, Economic Research Service, 2001. 77 p. (WRS-01-3).
- SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Relação entre a soma térmica efetiva e o crescimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 89-96, 2002.
- SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 241-249, 2001.
- SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R.C.; REIS, M.S. Melhoramento da soja. In: BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: Editora UFV, 1999. p.101-107.
- SETIYONO, T.D.; WEISS, A.; SPECHT, J.; BASTIDAS, A.M.; CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 100, p. 257-271, 2007.
- SHIBLES, R.M.; WERBER, C.R. Leaf area, solar radiation interception and dry matter production of soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 5, p. 575-577, 1965.

_____. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. **Crop Science**, Madison, v. 6, p. 55-59, 1966.

SHIBLES, R.M.; ANDERSON, I.C.; GIBSON, A.H. Soybean. In: EVANS, L.T. (Ed). **Crop physiology, some case histories**. London: Cambridge University Press, 1975. p. 151-189.

SHIBLES, R.M.; SECOR, J.; FORD, D.M. Carbon assimilation and metabolism. In: WILCOX, J.R. (Ed.). **Soybeans: improvement, production and uses**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America, 1987. p. 535-588.

SINCLAIR, T.R. Predicting carbon assimilation and crop radiation-use efficiency dependence on leaf nitrogen content. In: BOOTE, K. J.; LOOMIS, R.S. (Ed.). **Modeling crop photosynthesis-From biochemistry to canopy**. Madison: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America, 1991. p. 75-94. (CSSA. Special Publication, 19).

SINCLAIR, T.R.; DE WIT, C.T. Photosynthate and nitrogen requirements for seed production by various crops. **Science**, New York, v. 189, p. 565-567, 1975.

SINCLAIR, T.R.; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 90-98, 1989

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 65, p. 215-265, 1999.

SINCLAIR, T.R.; SHIRAIWA, T.; HAMMER, G.L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. **Crop Science**, Madison, v. 32, p. 1281-1284, 1992.

SINCLAIR, T.R.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low-latitude environments. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 53-59, 2005.

SPAETH, S.C.; SINCLAIR, T.R.; OHNUMA, T.; KONNO, S. Temperature, radiation and duration dependence of high soybean yields: measurement and simulation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 16, n. 4, p. 297-307, 1987.

SPITTERS, C.J.T.; SCHAPENDONK, A.H.C.M. Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. **Plant and Soil**, The Hague, v. 123, p. 193-203, 1990.

STUCKY, D.J. Effect of planting depth, temperature and cultivars on emergence and yield of double cropped soybeans. **Agronomy Journal**, Amsterdam, v. 68, p. 291-294, 1976.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719 p.

THOMAS, J.F.; RAPER, C.D. Jr. Photoperiodic control of seed filling for soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 16, p. 667–672, 1976.

THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology**: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology. London: Academic Press, 1976. 318 p.

TOLEDO, J.F.F. de. Genetics and breeding. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja. **Tropical soybean**: improvement and production. Rome: FAO, 1994. p. 19-36. (FAO Plant Production and Protection Series, 27).

URBEN FILHO, G.; SOUZA, P.I.M. de. Manejo da cultura da soja sob Cerrado: época, densidade e profundidade de semeadura. In: ARANTES, N. E.; SOUZA, P. I. M. de (Ed.). **Cultura da soja nos Cerrados**. Piracicaba: POTAFÓS, 1993. p. 267-298.

VAN KEULEN, H.; WOLF, J. **Modeling of agricultural production**: weather, soils and crops. Wageningen: Pudoc, 1986. p. 13-26. (Simulation Monographs).

VAN OIJEN, M.; LEFFELAAR, P.A. **Lintul-1**: potential crop growth. Wageningen: Pudoc, 2007, 2008.

VILLA NOVA, N.A.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; PEREIRA, A.R.; OMETTO, J.C. **Estimativa de graus-dia acumulado acima de qualquer temperatura basal, em função das temperaturas máxima e mínima**. São Paulo: USP, Instituto de Geografia, 1972. 8 p. (Caderno de Ciência da Terra).

WANG, D.; SHANNON, M.C.; GRIEVE, C.M. Salinity reduces radiation absorption and use efficiency in soybean. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 69, p. 267-277, 2001.

WELLS, R. Soybean growth response to plant density: relationships among canopy photosynthesis, leaf area, and light interception. **Crop Science**, Madison, v. 31, p. 755-761, 1991.

WHIGHAM, D.K.; MINOR, H.C. Agronomic characteristics and environmental stress. In: NORMAN, A.G. (Ed.). **The soybeans**: physiology, agronomy and utilization. Academic Press, New York, 1978. p. 89-91.

WILKERSON, G.G.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J.; BUOL, G.S. Photoperiodically sensitive interval in time to flower of soybean. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 721-726, 1989.

WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 47, p. 656-662, 1971.

ZHANG, L.; WANG, R.; HESKETH, J.D. Effects of photoperiod on growth and development of soybean floral bud in different maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 944–948, 2001.

ANEXOS

ANEXO 1

Matrizes de similaridade

Linha6-62.435/2	K	EUR	crexp	IAFcr	AFE	DIFERENÇA
K	***	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	0,397
LUE	-0,006	***	0,006	0,000	0,006	0,840
RGRL	-0,006	0,006	***	0,000	0,006	0,310
LAICR	-0,006	0,000	0,000	***	0,000	0,000
SLA	-0,006	0,006	0,006	0,000	***	0,191
DIFERENÇA	0,397	0,840	0,310	0,000	0,191	***

Linha6-41.834/1	K	EUR	crexp	IAFcr	AFE	DIFERENÇA
K	***	0,000	0,003	0,000	0,000	0,391
LUE	0,000	***	0,003	0,000	0,000	0,842
RGRL	0,003	0,003	***	0,000	0,000	0,311
LAICR	0,000	0,000	0,000	***	0,000	-0,004
SLA	0,000	0,000	0,000	0,000	***	0,190
DIFERENÇA	0,391	0,842	0,311	-0,004	0,190	***

Linha4-67.053/3	K	EUR	crexp	IAFcr	AFE	DIFERENÇA
K	***	0,000	0,005	0,000	0,000	0,334
LUE	0,000	***	0,003	0,000	0,000	0,853
RGRL	0,005	0,003	***	0,000	0,000	0,231
LAICR	0,000	0,000	0,000	***	0,000	-0,022
SLA	0,000	0,000	0,000	0,000	***	0,169
DIFERENÇA	0,334	0,853	0,231	-0,022	0,169	***

Linha6-51.680/2	K	EUR	crexp	IAFcr	AFE	DIFERENÇA
K	***	0,000	0,007	0,000	0,000	0,357
LUE	0,000	***	0,006	0,000	0,000	0,877
RGRL	0,007	0,006	***	0,000	0,000	0,254
LAICR	0,000	0,000	0,000	***	0,000	0,000
SLA	0,000	0,000	0,000	0,000	***	0,191
DIFERENÇA	0,357	0,877	0,254	0,000	0,191	***

Linha6-52.693/1	K	EUR	crexp	IAFcr	AFE	DIFERENÇA
K	***	0,000	0,004	0,000	0,000	0,357
LUE	0,000	***	0,003	0,000	0,000	0,877
RGRL	0,004	0,003	***	0,000	0,000	0,255
LAICR	0,000	0,000	0,000	***	0,000	0,000
SLA	0,000	0,000	0,000	0,000	***	0,192
DIFERENÇA	0,357	0,877	0,255	0,000	0,191	***

Linha6-52.685/1	K	EUR	crexp	IAFcr	AFE	DIFERENÇA
K	***	0,000	0,007	0,000	0,000	0,357
LUE	0,000	***	0,006	0,000	0,000	0,877
RGRL	0,007	0,006	***	0,000	0,000	0,255
LAICR	0,000	0,000	0,000	***	0,000	0,000
SLA	0,000	0,000	0,000	0,000	***	0,192
DIFERENÇA	0,357	0,877	0,255	0,000	0,192	***

Linha6-52.994/1	K	EUR	crexp	IAFcr	AFE	DIFERENÇA
K	***	0,000	0,004	0,000	0,000	0,358
LUE	0,000	***	0,003	0,000	0,000	0,876
RGRL	0,004	0,003	***	0,000	0,000	0,256
LAICR	0,000	0,000	0,000	***	0,000	0,000
SLA	0,000	0,000	0,000	0,000	***	0,192
DIFERENÇA	0,358	0,876	0,256	0,000	0,192	***

Linha6-41.720/1	K	EUR	crexp	IAFcr	AFE	DIFERENÇA
K	***	0,000	0,007	0,000	0,000	0,358
LUE	0,000	***	0,006	0,000	0,000	0,876
RGRL	0,007	0,006	***	0,000	0,000	0,256
LAICR	0,000	0,000	0,000	***	0,000	0,000
SLA	0,000	0,000	0,000	0,000	***	0,192
DIFERENÇA	0,358	0,876	0,256	0,000	0,192	***

ANEXO 2

Linguagem de programação criada em Visual Basic para a validação de simulação do modelo LINTUL

```
Sub Define_Constantes()
    DELT = 1
    KDF = 0.7
    LAICR = 6
    LAII = 0.017
    LUE = 1.8
    periodo = 181
    RGRL = 0.01
    SLA = 0.036
    Tbasal_inf = 10
    Tbasal_sup = 40
    Totima_inf = 28
    Totima_sup = 35
    TSUMI = 80
    TSUM1 = 819
    TSUM2 = 1093
    TTSUM = TSUM1 + TSUM2
End Sub
```

```
Sub Dimensiona_Variaveis()
    ReDim DAEm(periodo)
    ReDim DTEFF(periodo)
    ReDim DVR(periodo)
    ReDim DVRa(periodo)
    ReDim DVrb(periodo)
    ReDim DVS(periodo + 1)
    ReDim FLV(periodo)
    ReDim FST(periodo)
    ReDim FSO(periodo)
    ReDim FRT(periodo)
    ReDim GTOTAL(periodo)
    ReDim GLAI(periodo)
    ReDim RLAI(periodo)
    ReDim DLAI(periodo)
    ReDim DLV(periodo)
    ReDim LAI(0 To periodo)
    ReDim GLV(periodo)
    ReDim PARINT(periodo)
    ReDim RDRSH(periodo)
    ReDim RDRDV(periodo)
    ReDim RDR(periodo)
    ReDim DiaJ(periodo)
    ReDim TMMX(periodo)
    ReDim TMMN(periodo)
    ReDim DAVTMP(periodo)
    ReDim DTR(periodo)
```

```

ReDim RTSUM(periodo)
ReDim RTSUME(periodo)
ReDim RWLVG(periodo)
ReDim RWST(periodo)
ReDim RWSO(periodo)
ReDim RWRT(periodo)
ReDim TSUM(periodo)
ReDim TSUME(periodo)
ReDim WLVG(periodo)
ReDim WLVD(periodo)
ReDim WST(periodo)
ReDim WSO(periodo)
ReDim WRT(periodo)
ReDim WLW(periodo)
End Sub

Sub Define_Valores_Iniciais()
For x = 1 To periodo
    GLAI(x) = LAII / DELT
    GTOTAL(x) = 0
    FLV(x) = 0.69
    FST(x) = 0.11
    FSO(x) = 0
    FRT(x) = 0.2
    DVR(x) = 0
Next x
WLVI = LAII / SLA
WRTI = WLVI * 0.25
WLVG(0) = WLVI
WSO(0) = 0
WST(0) = 0
WRT(0) = WRTI
End Sub

Sub Leitura_Clima()
Arq$ = "Clima.csv"
a$ = App.Path + "/" + Arq$
Open a$ For Input As #1
    For x = 1 To periodo
        Input #1, DiaJ(x), TMMX(x), TMMN(x), DTR(x)
        DAVTMP(x) = (TMMX(x) + TMMN(x)) / 2
        DTR(x) = DTR(x) / 1000
    Next x
Close #1
End Sub

Sub Calcula_RTSUME()
For x = 1 To periodo
    RTSUME(x) = DAVTMP(x) - Tbasal_inf
Next x
End Sub

```

```

Sub Calcula_DVR()
ContTSUM = 0
ContTSUME = 0
DAE = 0
For x = 1 To periodo
    If x = 1 Then
        ContTSUME = 0
    Else
        ContTSUME = ContTSUME + RTSUME(x - 1)
    End If
    TSUME(x) = ContTSUME
    DAE(x) = DAE
    If TSUME(x) >= TSUMI Then
        RTSUM(x) = RTSUME(x)
        TSUM(x) = ContTSUM
        ContTSUM = ContTSUM + DAVTMP(x) - Tbasal_inf
        DAE = DAE + 1
        DTEFF(x) = RTSUME(x)
        DVRa(x) = (1 / TSUM1) * RTSUME(x)
        DVRb(x) = (1 / TSUM2) * RTSUME(x)
        If TSUME(x) - TSUMI - 15 < TSUM1 Then
            DVR(x) = DVRa(x)
        Else
            DVR(x) = DVRb(x)
        End If
    End If
Next x
End Sub

Sub Calcula_DVS()
Cont = 0
Ciclo = 0
For x = 1 To periodo
    If Cont < 1 Then
        Cont = Cont + DVRa(x)
    Else
        Cont = Cont + DVRb(x)
    End If
    DVS(x + 1) = Cont
    If DVS(x) > 0 And DVS(x) < 2 Then
        Ciclo = Ciclo + 1
    End If
Next x
End Sub

Sub Calcula_LAI()
LAI(0) = LAII
For x = 1 To periodo
    If DVS(x) > 0 And DVS(x) < 0.58 Then
        FLV(x) = 0.69 + ((0.58 - 0.69) / 0.58) * DVS(x)
        FST(x) = 0.11 + ((0.26 - 0.11) / 0.58) * DVS(x)
        FSO(x) = 0
        FRT(x) = 0.2 + ((0.16 - 0.2) / 0.58) * DVS(x)
    End If
Next x
End Sub

```

```

ElseIf DVS(x) >= 0.58 And DVS(x) < 0.9 Then
    FLV(x) = 0.58 + ((0.55 - 0.58) / (0.9 - 0.58)) * (DVS(x) - 0.58)
    FST(x) = 0.26 + ((0.3 - 0.26) / (0.9 - 0.58)) * (DVS(x) - 0.58)
    FSO(x) = 0
    FRT(x) = 0.16 + ((0.15 - 0.16) / (0.9 - 0.58)) * (DVS(x) - 0.58)
ElseIf DVS(x) >= 0.9 And DVS(x) < 1 Then
    FLV(x) = 0.55 + ((0.54 - 0.55) / (1 - 0.9)) * (DVS(x) - 0.9)
    FST(x) = 0.3 + ((0.34 - 0.3) / (1 - 0.9)) * (DVS(x) - 0.9)
    FSO(x) = 0
    FRT(x) = 0.15 + ((0.12 - 0.15) / (1 - 0.9)) * (DVS(x) - 0.9)
ElseIf DVS(x) >= 1 And DVS(x) < 1.25 Then
    FLV(x) = 0.54 + ((-0.54) / (1.25 - 1)) * (DVS(x) - 1)
    FST(x) = 0.34 + ((-0.34) / (1.25 - 1)) * (DVS(x) - 1)
    FSO(x) = (1 / (1.25 - 1)) * (DVS(x) - 1)
    FRT(x) = 0.12 + ((-0.12) / (1.25 - 1)) * (DVS(x) - 1)
ElseIf DVS(x) >= 1.25 Then
    FLV(x) = 0
    FST(x) = 0
    FSO(x) = 1
    FRT(x) = 0
End If
If DVS(x) > 0 Then
    PARINT(x - 1) = 0.5 * DTR(x - 1) * (1 - Exp(-KDF * LAI(x - 1)))
    GTOTAL(x - 1) = LUE * PARINT(x - 1)
End If
GLV(x - 1) = FLV(x - 1) * GTOTAL(x - 1)

If DVS(x) > 0 And DVS(x) * TSUM1 - 2 < 160 And LAI(x - 1) < 0.8 Then
    GLAI(x - 1) = LAI(x - 1) * (Exp(RGRL * DTEFF(x - 1) * DELT) - 1) /
DELT
Else
    GLAI(x - 1) = SLA * GLV(x - 1)
End If
If (DVS(x) - 1) < 0 Then
    RDRDV(x) = 0
Else
    ValorMax = 0.1
    If ValorMax < (2 - DVS(x)) Then
        ValorMax = 2 - DVS(x)
    End If
    RDRDV(x) = DVR(x) / ValorMax
End If
If ((LAI(x - 1) - LAICR) / LAICR >= 0) And ((LAI(x - 1) - LAICR) /
LAICR <= 1) Then
    RDRSH(x - 1) = (LAI(x - 1) - LAICR) / LAICR
ElseIf (LAI(x - 1) - LAICR) / LAICR < 0 Then
    RDRSH(x - 1) = 0
ElseIf (LAI(x - 1) - LAICR) / LAICR > 1 Then
    RDRSH(x - 1) = 1
End If
If RDRDV(x - 1) > RDRSH(x - 1) Then
    RDR(x - 1) = RDRDV(x - 1)
Else

```



```

        RDR(x - 1) = RDRSH(x - 1)
    End If
    DLAI(x - 1) = LAI(x - 1) * RDR(x - 1)
    RLAI(x - 1) = GLAI(x - 1) - DLAI(x - 1)
    LAI(x) = LAI(x - 1) + RLAI(x - 1)
Next x
End Sub
Sub Calcula_Massa_Relativa()
For x = 1 To periodo
    DLV(x - 1) = WLVG(x - 1) * RDR(x - 1): Rem ok
    RWLVG(x - 1) = GTOTAL(x - 1) * FLV(x - 1) - DLV(x - 1): Rem ok

    WLVD(x) = WLVD(x - 1) + DLV(x - 1): Rem ok
    WLVG(x) = WLVG(x - 1) + RWLVG(x - 1): Rem ok
    WLVD(x) = WLVG(x) + WLVD(x): Rem ok

    RWST(x) = GTOTAL(x) * FST(x): Rem ok
    RWSO(x) = GTOTAL(x) * FSO(x)
    RWRT(x) = GTOTAL(x) * FRT(x): Rem ok
Next x
For x = 1 To periodo
    WST(x) = WST(x - 1) + RWST(x - 1): Rem ok
    WSO(x) = WSO(x - 1) + RWSO(x - 1)
    WRT(x) = WRT(x - 1) + RWRT(x - 1): Rem ok
Next x
End Sub

```

ANEXO 3

Descrição - LINTUL-soja (FST)	Abreviação	Unidade	Cálculo
Condições iniciais do programa			
Biomassa das folhas na emergência	MIF	g.m^{-2}	=IAFi/AFE
Biomassa das raízes na emergência	MIR	g.m^{-2}	=MIF*0,25
Varição de tempo no cálculo da integral	DELT	d	
Momento final da simulação	FINTIM	d	
Momento inicial da simulação	STTIME	d	
Condições ambientais e soma térmica			
Radiação global total	Qg	$\text{kJ.m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	
Radiação solar	R	$\text{MJ.m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	=Qg/1.E+3
Temperatura média diária	TMED	°C	=0,5(TMMN+TMMX)
Temperaturas limítrofes para desenvolvimento da cultura		°C	
-basal inferior	Tbi	°C	
-basal superior	Tbs	°C	
-ótima inferior	Toi	°C	
-ótima superior	Tos	°C	
Dia do ano (Juliano)	DIA	d	
Variável auxiliar para cálculo da emergência	EMERG	-	=INSW (GDE-GDEM, 0.,1)
Variável auxiliar para cálculo da fase juvenil	PJU	-	=INSW (GD-GDJ, 0.,1)
Soma-térmica da semeadura até emergência	GDE	°C.d	=INTGRL(ZERO,TGDE)
Soma-térmica após emergência	GD	°C.d	=INTGRL(ZERO,TGD)
Soma-térmica após emergência (com fator fotoperíodo)	GDJ	°C.d	=INTGRL(ZERO,TGDJ)
Acúmulo de graus-dias entre a semeadura e emergência	TGDE	°C	=TATEMP*18
Acúmulo de graus-dias entre emergência e fase juvenil	TGD	°C	=TATEMP*18*EMERG = TGD+(TGD*FOTOP)*
Acúmulo de graus-dias após fase juvenil	TGDJ	°C	PJU
Alteração no DF em função da temperatura	TATEMP	°C	=AFGEN(FTEMP, TMED)
Função temperatura	FTEMP	-	<i>Função de 3-segmentos lineares</i> =TGDJ/INSW(DF-1.,GD1,GD2)
Taxa de alteração no desenvolvimento	TDF	d^{-1}	=INTGRL(ZERO,TDF)
Desenvolvimento fenológico	DF	-	<i>Função platô-linear</i> = 12. * (1. + (2./PI)* ASIN
Função Fotoperíodo	FFOTOP	-	(A/B)) =INSW (GD-GD1, AFGEN
Comprimento do dia	CDIA	horas	(FFOTOP,CDIA),0.)
Efeito do fotoperíodo	FOTOP	horas	
Intercepção de luz e taxa de acúmulo de massa de matéria seca			
Radiação fotossinteticamente ativa interceptada	RFAint	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	=EMERG*0,5*R*(1.-EXP(-KDF/LAI))
Taxa de acúmulo de massa de matéria seca total	TAMS	$\text{g.m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	=EUR*RFAint

Descrição - LINTUL-soja (FST)	Abreviação	Unidade	Cálculo
Crescimento e senescência foliar			
Taxa de acúmulo da massa de matéria seca das folhas	TMf	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	=FFO*TAMS
Temperatura efetiva	TEF	$^{\circ}\text{C}$	= TGD
Taxa relativa de mortalidade das folhas	TRM	d^{-1}	=MAX(TMS, TME)
Índice de área foliar	IAF	$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$	=INTGRL(IAFi, RLAI) =INSW(DF-
Taxa de mortalidade relativa devido ao envelhecimento	TME	d^{-1}	1.,0.,TDF/MAX(0.1,2.-DF)) = LIMIT(0., 1., (IAF-
Taxa de mortalidade relativa devido ao sombreamento	TMS	d^{-1}	IAFcr)/(IAFcr)
Taxa de senescência foliar	TSF	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	=MSfv*TRM
Senescência do IAF	SIAF	d^{-1}	=IAF*TRM
Crescimento do IAF	CIAF	$\text{m}^2.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	<i>em função do DF: exponencial ou linear</i>
Taxa de crescimento da área foliar	TCFO	$\text{m}^2.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	=CIAF-SIAF
Taxas de crescimento e partição de fotoassimilados			
Fração de massa de matéria seca alocada para as raízes	FRZ	-	=AFGEN(CPR, DF)
Fração de massa de matéria seca alocada para as folhas	FFO	-	=AFGEN(CPF, DF)
Fração de massa de matéria seca alocada para as hastes	FHA	-	=AFGEN(CPH, DF)
Fração de massa de matéria seca alocada para os grãos	FGR	-	=AFGEN(CPG, DF)
Massa de matéria seca das folhas verdes	MSfv	g.m^{-2}	=INTGRL(MIF, TMSfv)
Massa de matéria seca das folhas secas	MSfs	g.m^{-2}	=INTGRL(ZERO, TMSfs)
Massa de matéria seca das hastes	MSh	g.m^{-2}	=INTGRL(ZERO, TMSH)
Massa de matéria seca dos grãos	MSg	g.m^{-2}	=INTGRL(ZERO, TMSg)
Massa de matéria seca das raízes	MSr	g.m^{-2}	=INTGRL(MIR, TMSr)
Taxa líquida de acúmulo de massa de matéria-seca nas folhas	TMSf	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	=TAMS*FFO-TSF
Taxa de acúmulo de massa de matéria-seca nas raízes	TMSr	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	=TAMS*FRZ
Taxa de acúmulo de massa de matéria-seca nos grãos	TMSg	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	=TAMS*FGR
Taxa de acúmulo de massa de matéria-seca nas hastes	TMSH	$\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	=TAMS*FHA