

Modelo de Simulação do Crescimento de Plantas

Modeling of plant growth simulation

Tatiane Bernardon¹
Marcelo Calgaro²

Resumo

Para a construção de um modelo de simulação do crescimento de plantas, torna-se necessário o conhecimento das metodologias utilizadas por diversos autores, sendo hoje encontradas em artigos científicos publicados nas revistas referentes a este assunto espalhadas pelo mundo todo. Vendo a necessidade de se obter um trabalho que reunisse o “estado da arte” das metodologias utilizadas nestes trabalhos, é que se oportunizou esta revisão bibliográfica. Este trabalho foi formado com a análise da literatura atual, para, como resultado, obter-se uma gama de trabalhos, com suas respectivas metodologias, reunidas em somente um documento, para que, com isso, seja possível uma análise destes métodos utilizados para aplicação em trabalhos científicos na área de modelagem e simulação do crescimento de plantas.

Palavras-chave: Modelagem, Simulação, Estado da Arte.

Summary

For the construction of a model of simulation of the growth of plants, the knowledge of the methodologies used for diverse authors, being found becomes today necessary in published scientific articles in the referring magazines to this subject spread by the world all. Seeing the necessity of if getting a work that congregated the “state of the art” of the methodologies used in these works, it is that this bibliographical revision was become fulfilled. This work was formed with the analysis of current literature, for, as resulted, to get a gamma of works, with its respective

1 M.Sc. Bióloga; Universidade Federal de Santa Maria; E-mail: bernardon@mail.ufsm.br

2 Dr. Engenheiro Agrônomo; Pesquisador do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido – EMBRAPA; Email: marcelo.calgaro@cpatsa.embrapa.br

Recebido para publicação em 25/07/2006 e aceito em 07/02/2007

methodologies, congregated in only a document, so that with this, either possible an analysis of these methods used for application in scientific works in the modeling area and simulation of the growth of plants.

Key words: Modeling, Simulation, State of the art.

Introdução

Apresentando como grandes características a multidisciplinaridade e o caráter integrador, os modelos de simulação têm se tornado ao longo dos anos uma ferramenta altamente eficiente e complementar às pesquisas experimentais convencionais (PEREIRA, 1987; BOOTE et al. 1996; COSTA, 1997).

Os modelos de simulação da colheita transformaram-se, segundo Sentelhas et al. (2001), em uma ferramenta cada vez mais valiosa na ciência da agricultura e de pesquisa. Os modelos podem ser usados para simular o crescimento de colheitas individuais ou a gerência de sistema de cultivos (MEINKE et al. 1995; BOOTE et al. 1996). Podem também ser usados para a melhoria dos genótipos e dos cultivares (BRANCO, 1998), o manejo da água de irrigação (MACROBERT e SELVAGEM, 1998), e a avaliação de risco da colheita e a segurança do alimento (THORNTON e WILKENS, 1998).

Por este motivo é que se fazem necessários os modelos de simulação, sendo que estes auxiliam para a identificação de práticas de manejo da cultura (época de semeadura, espaçamento, adubação, etc) que podem ser realizadas com baixo custo, utilizando-se série histórica de dados climatológicos conforme o estudo de Muchow et al. (1991). Nessas

simulações, diferentes características agronômicas e fisiológicas possíveis de melhoramento genético podem ser utilizadas como entrada (*inputs*) para verificar seu efeito na estabilidade e aumento de rendimento sob condições de manejo e variabilidade climática da região de estudo (TOJO-SOLER et al. 2001).

Uma das limitações principais para o uso e aplicação de modelos da simulação da colheita é a falta da entrada dos dados exatos que descrevem a variabilidade espacial e temporal dos fatores principais necessários para predizer o desempenho da colheita (RITCHIE et al. 1990 apud SENTELHAS et al. 2001).

Desenvolvimento

Conceito de Modelo

Um modelo é uma representação de um sistema em uma determinada linguagem. A decisão da forma de descrição mais fidedigna à representação pretendida do sistema está diretamente associada aos interesses envolvidos no estudo por modelagem (PESSOA et al. 1997).

Tipos de Modelos

Existem vários tipos de modelos, sendo os mais importantes: a) Modelos Conceituais, b) Modelos Físicos e, c) Modelos Matemáticos. Por se tratar de o modelo mais utilizado para este fim

de Modelo de Simulação, tratar-se-á detalhadamente o Modelo Matemático.

**Modelos matemáticos*: são descrições construídas em linguagem matemática, mediante simplificações do sistema, sendo representados por: componentes, variáveis, parâmetros e relações funcionais (NAYLOR et al, 1977 apud PESSOA et al, 1997).

Na existência de inter-relações entre as entradas, os estados e as saídas, os modelos são denominados causais. Nesse caso, são amplamente aplicados à compreensão e ao estudo de agroecossistemas (PESSOA et al, 1997).

No meio agrônomo, os modelos matemáticos mais difundidos são os empíricos, essencialmente descritivos e identificados por equações matemáticas capazes de representar os dados experimentais de forma aceitável. Esse tipo de modelo é resultado única e diretamente de trabalho experimental (PROSSER, 1993, apud PESSOA et al, 1997). Seu propósito é descrever o que foi observado experimentalmente ou coletado em um levantamento (PESSOA et al, 1997).

As formas das equações ou funções utilizadas, em princípio, podem ser generalizadas, mas o modelo é válido somente para uma série de dados da qual foi produzido (PESSOA et al, 1997).

Por ser resultante de dados experimentais, geralmente esse tipo de modelo é apresentado em gráficos onde são plotados os valores reais, os valores por ele estimados e os desvios. Como exemplos de suas aplicações estão as curvas de análise de crescimento, as curvas de resposta de taxas de fotossíntese

à radiação solar, à água e à temperatura etc. (PESSOA et al, 1997).

Passos para o desenvolvimento de um Modelo de Simulação

Segundo Pessoa et al. (1997), para obter a construção de um modelo de simulação é necessário seguir alguns passos, como:

1. Formulação do problema;
2. Coleta e processamento de dados reais (amostragens e coleta de informações na literatura científica);
3. Formulação de um modelo matemático:
 - 3.1 Especificação dos componentes (elementos);
 - 3.2 Especificação das variáveis e dos parâmetros;
 - 3.3 Especificação das relações funcionais.
4. Estimativa de parâmetros para as características operacionais, através de dados reais;
5. Avaliação do modelo;
6. Formulação de um programa de computador;
7. Validação;
8. Projeto de experiências de simulação (cenários);
9. Análise dos dados obtidos na simulação.

Assim, todo simulador, necessariamente, apresenta um ou mais modelos matemáticos, que, depois de testados e ajustados para o problema em estudo, são transcritos para linguagem computacional, juntamente com as rotinas de entrada de dados, que permitirão a criação de cenários a serem simulados, as rotinas de saídas gráficas e as de alternativas de emissão

de relatórios, entre outras opções que auxiliam na análise dos resultados pela simulação realizada. Portanto, um modelo matemático, por si só, não é um simulador, mas a representação de um problema em linguagem matemática (PESSOA et al, 1997).

Estudo de Modelos Agrometeorológicos

A Figura 1 demonstra o esquema de um modelo de crescimento de planta. O modelo é dividido em três partes principais. Na primeira, calcula-se o ganho de carbono diário do sistema por meio da fotossíntese bruta. Na segunda, consideram-se as perdas de carbono do sistema, ou seja, a respiração. Uma vez conhecido o balanço de carbono, a terceira parte considera a transformação do carbono em carboidrato e sua distribuição para as diversas partes da planta, ou seja, as folhas, o colmo, as raízes e os órgãos de armazenamentos (COSTA e BARROS, 2001).

Diversos pesquisadores desenvolveram ou testaram modelos que relacionam o rendimento de grãos com variáveis meteorológicas, com a finalidade de estabelecer funções de predição do rendimento (JENSEN, 1968; THOMPSON, 1969; BAIER, 1973; HANKS, 1974; NELSON e DALE, 1978; FRERE e POPOV, 1980; BERLATO, 1987; LIU et al. 1989; CAMARGO e HUBBARD, 1993; entre outros apud MATZENAUER et al. 1995).

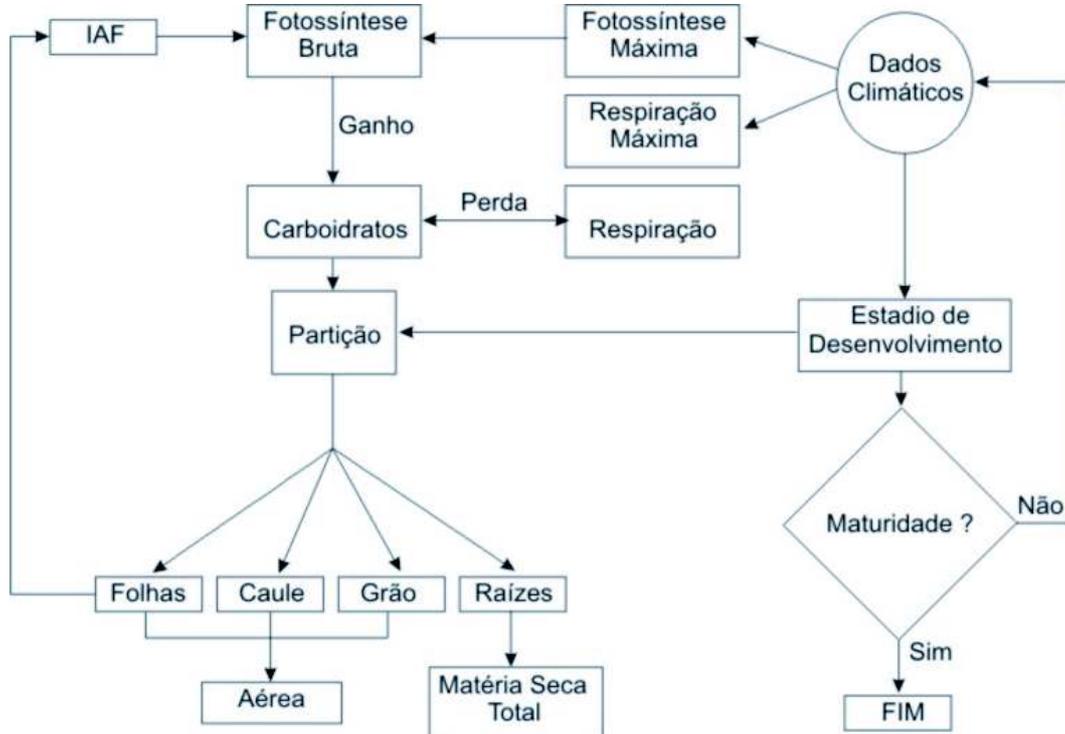
Grande parte dos trabalhos apresenta modelos que utilizam, como variável independente, alguma expressão da disponibilidade hídrica, como precipitação pluvial, transpiração,

evapotranspiração real, deficiência hídrica, relação entre precipitação e evapotranspiração de referência, relação entre evapotranspiração real e evapotranspiração máxima ou de referência. Rao et al. (1988) apud Matzenauer et al. (1995) relacionam uma série de modelos de estimativa do rendimento.

Baier (1979) apud Matzenauer et al. (1995) fez uma revisão sobre os trabalhos que apresentam modelos de relação planta-clima, com o objetivo de propor uma classificação considerando escala de tempo, fonte de dados, abordagem, propósito e aplicações dos modelos. Usando estas características, foram sugeridos três grupos de modelos: (1) modelos de simulação do crescimento; (2) modelos de análise planta-clima; e (3) modelos estatístico-empíricos.

Os modelos de simulação do crescimento consideram que o impacto das variáveis meteorológicas sobre um processo específico tal como fotossíntese, transpiração ou respiração, pode ser adequadamente simulado através de um conjunto de equações matemáticas, as quais são baseadas em dados experimentais. Como exemplos deste grupo podem ser citados os modelos CORNGRO (TSCHENCHKE e GILLEY, 1979), e SOYGRO utilizado por Siqueira e Berg (1991) (MATZENAUER et al. 1995).

Os modelos de análise planta-clima procuram explicar, baseados em processos físicos e fisiológicos, o efeito de uma ou mais variáveis meteorológicas sobre a resposta das plantas. Esta categoria de modelos utiliza, frequentemente, dados de conteúdo de água no solo ou evapotranspiração

Figura 1. Diagrama de um modelo de crescimento de planta (COSTA e BARROS, 2001)

e outras variáveis, e as relacionam com informações de desenvolvimento morfológico, crescimento vegetativo ou rendimento das culturas (BAIER, 1979). Nesta categoria podem ser citados os modelos de Jensen (1968), Baier (1973), Frere e Popov (1980) apud Matzenauer et al. (1995).

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

Liu (1987) e Cuelar et al. (1991) apud Matzenauer et al. (1995).

Hanks e Rasmussen (1982) apud Matzenauer et al. (1995) fizeram uma revisão sobre a predição do rendimento das culturas em relação ao estresse de água na planta. Citam que a produção das culturas é, freqüentemente, limitada pela insuficiência de água em algum período durante a estação de crescimento, e que, mesmo em regiões úmidas, ocorrem, normalmente, períodos de menor precipitação que conduzem ao estresse hídrico. Os autores afirmam que o rendimento das plantas pode ser estimado pela análise da razão de transpiração (relação entre transpiração (T) e rendimento (Y)), ocorrendo, no entanto, variações devido à dependência dos elementos meteorológicos.

Um grande passo na derivação de métodos de predição do rendimento das plantas, com base no uso da água, foi dado por De Witt (1958). Ele forneceu evidências de que o rendimento das plantas (Y) está diretamente relacionado à razão entre a transpiração (T) e a evaporação potencial (Eo) (MATZENAUER et al. 1995).

Diversos pesquisadores têm utilizado a evapotranspiração como base nos modelos de estimativa do rendimento. JENSEN (1968) propôs um modelo que utiliza a relação entre a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração máxima (ETm) para estimativa do rendimento relativo (Y/Ym), e que permite estabelecer pesos diferentes para os diversos estádios de desenvolvimento da cultura (MATZENAUER et al. 1995).

Variáveis necessárias para um Modelo de Simulação de Crescimento de Culturas

Evapotranspiração

A quantidade de água consumida pela planta em condições naturais de disponibilidade hídrica (evapotranspiração real – ETr) relacionada ao consumo de água sem restrição hídrica (evapotranspiração máxima – ETm) fornece o consumo relativo de água, representado pelo índice ETr/ETm (MATZENAUER, 2002).

Segundo Matzenauer (2002), a evapotranspiração máxima (ETm) estima-se utilizando-se o coeficiente de cultura (Kc), enquanto que a evapotranspiração real (ETr) estima-se pelo balanço hídrico decendial.

$$ETm = Kc \cdot ETo$$

onde, Kc é o coeficiente de cultura (MATZENAUER, 1998b apud MATZENAUER, 2002) e ETo é a evapotranspiração de referência calculada pelo método de PENMAN (1956). A evapotranspiração real foi estimada por um balanço hídrico decendial obtido pelo método de Thornthwaite e Mather (1995), utilizando-se uma CAD (capacidade de água disponível do solo) de 75 mm.

Para o trabalho de Matzenauer et al. (1998a) a evapotranspiração máxima da cultura (ETm) foi calculada pela equação:

$$ETm = P + I - D$$

sendo, P a precipitação pluvial (mm), I a quantidade de água (mm) aplicada através da irrigação e D, a quantidade de água drenada (mm).

Fotossíntese Bruta Diária

De acordo com De Vries et al (1989), a fotossíntese bruta diária pode ser calculada pela equação:

$$Pd = \frac{Pmh}{k} \ln \left[\frac{\Omega + \beta + (2\Omega\beta^2)^{1/2}}{\Omega \exp^{-kIAF} + \beta + (2\Omega\beta \exp^{kIAF} + \beta^2)^{1/2}} \right]$$

em que: $\Omega = \alpha k / h$; $\beta = (1 - \tau) P_m$; $P_m = P_{m20} \Psi$; $\Psi = (T_{med} + T_r) / (T_r - T_b)$; P_{m20} a fotossíntese máxima a 20°C (kg CO₂ m⁻²s⁻¹); T_r a temperatura de referência fixada em 10°C; T_{med} a temperatura média do ar (°C); T_b a temperatura base da cultura (°C); α a eficiência fotossintética máxima (kg CO₂ m⁻²s⁻¹); τ o coeficiente de transmissividade (adimensional); IAF o índice de área foliar (adimensional); P_m a fotossíntese bruta máxima (kg CO₂ m⁻²s⁻¹); h a duração do dia(s) e k o coeficiente

de extinção da cultura (adimensional) (COSTA e BARROS, 2001).

Fluxo de radiação solar

O fluxo de radiação solar direta (R_d) calcula-se a partir da radiação global média, adaptado de Fuchs et al. (1984) e Santos (1998), do seguinte modo:

$$R_d = \left(\frac{R_{de}}{R_{ge}} \right) (R_g)$$

sendo, R_{de} a radiação solar direta estimada, R_{ge} a radiação global estimada (CAMPBELL, 1977) e R_g a radiação global medida.

Respiração de Manutenção

A respiração de manutenção, segundo Costa e Barros (2001), calcula-se de acordo com o método proposto por De Vries et al. (1989):

$$R_m = R_{mr} \cdot \Psi$$

em que: R_m é a taxa de respiração máxima ($\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e R_{mr} a taxa de respiração de referência fixada a 20°C e $\Psi = (T_{\text{med}} + T_r) / (T_r - T_b)$. Considerando a respiração individualmente para cada parte da planta (COSTA e BARROS, 2001).

Graus-Dia

Todos os aspectos fisiológicos e funções da planta ocorrem, para LOZADA et al. (1999), dentro de limites térmicos no ambiente em que elas se desenvolvem. Para completarem cada subperíodo do desenvolvimento, as plantas necessitam, entre outros fatores, um somatório térmico. Um dos índices mais utilizados para expressar esse requerimento é o denominado graus-

dia, que se baseia no acúmulo térmico dentro dos limites nos quais a planta se desenvolve, definidos pelas temperaturas basais inferior e superior.

Ainda, Lozada et al. (1999) afirma que o cálculo de graus-dia é indicado quando a temperatura é o grande fator determinante da taxa de desenvolvimento, não existindo limitações de outros fatores do ambiente para esse processo.

De acordo com Coelho e Dale (1980), os graus-dia têm uma relação linear com o desenvolvimento da planta, sendo este usado como variável independente para descrever o crescimento e desenvolvimento da planta (DWYER e STEWAR, 1986 apud GUISTEM et al. 2001).

O acúmulo de graus-dia (GD) calcula-se, segundo Berlatto et al. (1984):

$$GD = T_{\text{med}} - T_b$$

onde, T_{med} é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$), obtida a partir de 24 temperaturas horárias, e T_b é a temperatura mínima basal (FRANÇA et al. 1999).

De acordo com Guissem et al. (2001), o cálculo de graus-dia, se dá por meio da equação:

$$GD = (\text{TempMáx} - \text{TempMin}) / 2 - \text{Temp.base}$$

Índice de Área Foliar (IAF)

O índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) é a relação funcional existente entre a área foliar e a área do terreno ocupada pela cultura (FAVARIN et al. 2002).

O desenvolvimento da folha, caracterizado pela taxa de produção

de novas folhas, pelo número total de folhas produzidas e pela duração da área fotossinteticamente ativa, é um importante processo no sistema de produção da cultura (WARRINGTON e KANEMASU, 1983 apud GUISTEM et al. 2001). A área foliar determina a quantidade de radiação interceptada e, conseqüentemente, o crescimento, o desenvolvimento e a produção final da cultura (Sinclair, citado por DWYER e STEWART, 1986 apud GUISTEM et al. 2001).

De acordo com o modelo proposto por DE VRIES et al. (1989), COSTA e BARROS (2001) propuseram o cálculo do IAF:

$$IAF = MSF / PE$$

onde, MSF é a matéria seca das folhas (kg m⁻²) e PE a massa específica das folhas (m² kg⁻¹).

Segundo o modelo de BEADLE (1993), o IAF é determinado segundo:

$$IAF = AF / S$$

sendo, AF a área foliar da amostra (m²) e S a área do terreno ocupada pela amostra (m²) (FRANÇA et al. 1999).

Para FAVARIN et al. (2002), o IAF (m² m⁻²) estimou-se pela substituição dos valores determinados para cada variável independente de acordo com a equação:

$$IAF = \alpha + \beta X$$

em que, α e β se referem aos parâmetros empíricos do modelo linear determinados por análise de regressão pelo método dos quadrados mínimos, e

X, à variável independente, utilizada com o objetivo de verificar qual parâmetro (massa de matéria seca das folhas, número total de folhas por planta, altura das plantas, volume do dossel, área lateral do dossel, área de seção inferior do dossel, diâmetro da seção inferior do dossel, área da seção média do dossel, diâmetro da seção média do dossel, altura do primeiro par de ramos, diâmetro da seção superior do dossel e área da seção superior do dossel) melhor se relaciona com índice de área foliar.

No trabalho de Radin et al. (2000), o índice de área foliar foi estimado a partir da altura da cultura, através de modelo ajustado na própria cultura e local por Santos (1998) e França (1997):

$$IAF = -0.51 + 0,04h - 6,36.10^{-5}h^2$$

sendo, h a altura do dossel (cm).

Acúmulo de Matéria Seca

O acúmulo de matéria seca, ao longo do tempo é descrito por DE VRIES et al. (1989) da seguinte forma:

$$\frac{dw}{dt} = (Pd - Rm.w)Eg$$

em que, dw/dt é a variação de matéria seca (kg m⁻²s⁻¹) e Eg a respiração de crescimento, isto é, a eficiência de conversão de carboidratos em matéria seca (kg m⁻²s⁻¹). Para cada parte estrutural da planta Eg assume um valor de acordo com De Vries et al. 1989 apud Costa e Barros (2001).

Em função dos dois parâmetros meteorológicos: PAR_{inc} (radiação

fotossinteticamente ativa incidente) e acúmulo de graus-dia (GD); a produção de matéria seca pode ser determinada através da seguinte equação:

$$MSa = \alpha * PAR_{inc} * \varepsilon_{i2}$$

sendo, α determinado pela equação: $MSa = \alpha * PAR_{inc}$ e ε_{i2} (eficiência de interceptação de PAR estimada) pela fórmula: $\varepsilon_{i2} = \beta * (1 - \exp^{-k * IAF_{GD}})$ onde β é a máxima eficiência de interceptação determinada pela equação: $\varepsilon_i = 1 - CT$, IAF_{GD} foi calculado pela regressão entre o acúmulo de graus-dia (GD) e o IAF observado, e k é o coeficiente de extinção determinado segundo Campbel, 1986 apud França et al. (1999).

Rendimento da Cultura

Segundo Doorenbos e Kassam (1994), para calcular o rendimento da cultura, existem dois métodos:

a) MÉTODODE “WAGENINGEN”, uma adaptação do método avaliado pelo International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) de Wageningen, o qual é baseado em trabalhos anteriores de De Wit, Bierhuizen, Rijtema, Feddes e Kowalik (SLABBERS, 1978 apud DOORENBOS e KASSAM, 1994).

Este método apresenta as relações matemáticas para converter a matéria seca produzida em rendimento de produto comercializável, dependendo dos déficits hídricos durante os diferentes períodos de desenvolvimento da cultura. Ainda, este método fornece uma simplificação adicional do modelo linear, supondo-se que a produção máxima de matéria seca ocorra com a evapotranspiração máxima e aplicando correções simplificadas

à produção de matéria seca para obter o rendimento comercializável (DOORENBOS e KASSAM, 1994).

Para se calcular o rendimento “experimental” (Y_{me}), segundo o MÉTODO DE “WAGENINGEN” serão necessários:

– Calcular a produção bruta de matéria seca da cultura padrão (Y_o);

$$Y_o = F.y_o + (1 - F)y_c$$

– Aplicar correção para o clima { $E_{tm}/(e_a - e_d)$ };

– Aplicar correção para a espécie de cultura (K);

– Aplicar correção para a temperatura (cT);

– Aplicar correção para a parte colhida (cH).

b) MÉTODO DA ZONA AGRO-ECOLÓGICA, o método desenvolvido por Kassam (1977) para o Projeto de Zonas Agroecológicas (Modelo FAO) (DOORENBOS e KASSAM, 1994).

Nesse método, supõe-se que sejam satisfeitas as necessidades climáticas da cultura e que a água, os nutrientes, a salinidade, as pragas ou as doenças não afetam seu crescimento nem seu rendimento potencial (Y_{mp}). E, sabe-se que em condições reais ocorrerão perdas de rendimento devido a vários fatores, portanto, são feitas correções para que o rendimento potencial calculado (Y_{mp}) possa indicar uma eficiência real na produção agrícola.

Para se calcular o rendimento potencial (Y_{mp}) serão necessários:

– Calcular a produção bruta de matéria seca de uma cultura padrão (Y_o);

$$Y_o = F.y_o + (1-F)y_c$$

– Aplicar correção para a espécie de cultura e a temperatura;

– Aplicar correção para o desenvolvimento da cultura em relação ao tempo e à área foliar (cL);

– Aplicar correção para a produção líquida de matéria seca (cN);

– Aplicar correção para a parte colhida (cH).

Para Affholder et al. (1997), o coeficiente cultural, K_c , a razão ET^*/ET_0 é que permite a dedução da ET^* , e é calculado a partir do IAF, conforme Ritchie e Burnett (1971):

$$K_c = ET^*/ET_0 = (a \cdot IAF) / (b + IAF)$$

onde, a e b são parâmetros de calibração.

Segundo FERRAUTO et al. (1995), o modelo utilizado para o cálculo do rendimento da cultura foi o de Doorenbos e Kassam (1979), onde a expressão é:

$$\left(I - \frac{Y}{Y_m} \right) = \sum_{a=1}^N K_a \left(I - \frac{ETR}{ET_m} \right)_1$$

onde, Y/Y_m é o rendimento relativo de grãos, Y o rendimento total de grãos estimado no ano (kg/ha), Y_m o rendimento máximo de grãos, correspondente a ET_m (kg/ha), K_a o coeficiente de sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico no estádio a , N o número de estádios do

desenvolvimento anual da cultura, ETR/ET_m a evapotranspiração relativa, ETR a evapotranspiração real (mm) e ET_m a evapotranspiração máxima, ou demanda ideal, da cultura considerada (mm).

Conclusão

O sucesso da utilização dos modelos de simulação dependerá da resolução de difíceis problemas num futuro próximo. Concretamente, é necessário aumentar a sensibilidade dos modelos a fatores como, a consorciação de culturas, a incorporação de resíduos no solo, as pragas e doenças e as interações entre culturas e animais da exploração. Até isso acontecer, os modelos de simulação de culturas continuarão a ser incapazes de representar importantes sistemas de agricultura. É, ainda, necessário prosseguir o desenvolvimento das metodologias baseadas em regras, como modo de integrar as variáveis qualitativas que mais condicionam a tomada de decisão do agricultor.

Por último, é importante realçar que um modelo é uma ferramenta como outra qualquer, estando particularmente bem adaptado para a resolução de um determinado tipo de problema, mas é completamente ineficaz na resolução de outros. Quer isto dizer, que a resolução de novos problemas, requer a construção de novos modelos.

Referências

AFFHOLDER, F.; RODRIGUES, G. C.; ASSAD, E. D. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 32, n. 10, p. 993-1002, out. 1997.

- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potencial uses and limitations of crop model. *Agronomy Journal*, Madison, v. 88, p. 704-716, 1996.
- COSTA, L. C.; BARROS, A. H. C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 75-82, 2001.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. M. *Efeito da água no rendimento das culturas*. Campina Grande, UFPB, 1994.
- FAVARIN, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA, A. G.; VILLANOVA, N. A.; FAVARIN, M. G. V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v. 37, n. 6, p. 769-773, jun. 2002.
- FERRAUDO, A. S.; ANDRÉ, R. G. B.; PINHO, S. Z. Modelo agrometeorológico para estimar rendimento de grãos de milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 3, p. 93-96, 1995.
- FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.M.G. Modelagem de crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.
- GUISCEM J. M.; SANS, L. M. A.; NAKAGAWA, J.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; MATEUS, G. P. Crescimento e desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays*, L.) em semeadura tardia e sua relação com graus-dia e radiação solar global. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 251-260, 2001.
- LIMA, M.G. *Calibração e validação do modelo CERES-MAIZE em condições tropicais do Brasil*. Piracicaba: ESALQ/USP, 1995. 119p. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, 1995.
- LOZADA, B. I.; ANGELOCCI, L. R. Determinação da temperatura-base e de graus-dia para estimativa da duração do subperíodo da semeadura à floração de um híbrido de milho (*Zea mays*). *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 31-36, 1999.
- MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; RIBOLDI, J. Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 225-241, 1995.
- MATZENAUER, R.; BERGAMACHI, H.; BERLATO, M. A.; MALUF, J. R. T. Evapotranspiração da cultura do milho. I: Efeito de épocas de semeadura. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 9-14, 1998a.
- MATZENAUER, R.; BERGAMACHI, H.; BERLATO, M. A. Evapotranspiração da cultura do milho. II: Relações com a evaporação do tanque classe A, com a evapotranspiração de referência e com a radiação solar global, em três épocas de semeadura. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 15-21, 1998b.

MATZENAUER, R. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura do milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 35-43, 2002.

PEREIRA, A.R. Simulação do crescimento e da produtividade. SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1997. Campinas, SP. *Anais...*, Campinas: Fundação Cargill. v 17, p. 201-209. 1987.

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

RADIN, B.; SANTOS, A. O.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G.; GERGONCI, J. I. Estimativa da evapotranspiração da cultura do milho pelo método Penman-Monteith modificado. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 185-191, 2000.

SENTELHAS, P. C.; FARIA, R. T. de; CHAVES, M. O.; HOOGENBOOM, G. Evaluation of the WGEN and SIMMETEO weather generators for the brazilian tropics and subtropics, using crop simulation models. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 357-376, 2001.

TOJO-SOLER, C.; FOLEGATTI, M. V.; FARIA, R. T. de. Uso do modelo CERES-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho “safrinha”. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 339-346, 2001.