

ISSN 1677-9274

Levantamento de Modelos Matemáticos Aplicados à Cana-de-Açúcar



República Federativa do Brasil

Fernando Henrique Cardoso
Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Marcus Vinicius Pratini de Moraes
Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa**Conselho de Administração**

Márcio Fortes de Almeida
Presidente

Alberto Duque Portugal
Vice-Presidente

Dietrich Gerhard Quast
José Honório Accarini
Sérgio Fausto
Urbano Campos Ribeiral
Membros

Diretoria Executiva da Embrapa

Alberto Duque Portugal
Diretor-Presidente

Bonifácio Hideyuki Nakasu
Dante Daniel Giacomelli Scolari
José Roberto Rodrigues Peres
Diretores-Executivos

Embrapa Informática Agropecuária

José Gilberto Jardine
Chefe-Geral

Tércia Zavaglia Torres
Chefe-Adjunto de Administração

Kleber Xavier Sampaio de Souza
Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Álvaro Seixas Neto
Supervisor da Área de Comunicação e Negócios

Documentos 1

ISSN 1677-9274

Levantamento de Modelos Matemáticos Aplicados à Cana-de-Açúcar

Fábio Cesar da Silva
Alessandra Fabíola Bergamasco

Embrapa Informática Agropecuária
Área de Comunicação e Negócios (ACN)

Av. Dr. André Tosello s/nº
Cidade Universitária "Zeferino Vaz" – Barão Geraldo
Caixa Postal 6041
13083-970 – Campinas, SP
Telefone/Fax: (19) 3789-5743
URL: <http://www.cnptia.embrapa.br>
Email: sac@cnptia.embrapa.br

Comitê de Publicações

Amarindo Fausto Soares
Francisco Xavier Hemerly (Presidente)
Ivanilde Dispato
José Ruy Porto de Carvalho
Marcia Izabel Fugisawa Souza
Suzilei Almeida Carneiro

Suplentes

Fábio Cesar da Silva
João Francisco Gonçalves Antunes
Luciana Alvin Santos Romani
Maria Angélica de Andrade Leite
Moacir Pedroso Júnior

Supervisor editorial: *Ivanilde Dispato*
Normalização bibliográfica: *Marcia Izabel Fugisawa Souza*
Foto capa: *Maria Augusta Garcia*
Capa: *Intermídia Publicações Científicas*
Editoração eletrônica: *Intermídia Publicações Científicas*

1ª edição

Todos os direitos reservados

Silva, Fábio Cesar da.

Levantamento de modelos matemáticos aplicados à cana-de-açúcar / Fábio Cesar da Silva e Alessandra Fabíola Bergamasco. — Campinas : Embrapa Informática Agropecuária, 2001.

26 p. : il. — (Documentos / Embrapa Informática Agropecuária ; 1)

ISSN 1677-9274

1. Modelo matemático. 2. Cana-de-açúcar. I. Bergamasco, Alessandra Fabíola. II. Título. III. Série.

CDD – 630.2118 (21. ed.)

Autores

Fábio Cesar da Silva

Eng. Agr., Dr. em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Caixa Postal 6041, Barão Geraldo - 13083-970 – Campinas, SP. e-mail fcesar@cnptia.embrapa.br

Alessandra Fabíola Bergamasco

Zootecnista, Bolsista Fapesp, Embrapa Informática Agropecuária. e-mail afb@cnptia.embrapa.br

Apresentação

O Brasil, com uma área canavieira de 5 milhões de hectares, caracteriza-se como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, perfazendo 30% do mercado internacional de açúcar e gerando 50% do álcool produzido no mundo.

Essa cultura tem importância estratégica para o país. No campo ambiental, reduz o efeito estufa e o consumo de petróleo. Gera 1,15 milhões de empregos diretos e indiretos e 600 mil postos de trabalho no Estado de São Paulo, onde o piso salarial é 70% superior ao salário mínimo; representando 8% do PIB agrícola nacional e 35% do PIB agrícola paulista. O agronegócio da cana movimentava 12 bilhões por ano.

No momento, a produção de álcool está aquecida pela expectativa de uma demanda potencial na ordem de bilhões de litros de exportação para os Estados Unidos e o Japão por motivos ambientais, causados pelo uso de MTBE em mistura de combustível.

Outro aspecto levantado é o potencial de geração de energia da cana-de-açúcar, o bagaço produzido equivale a energia gerada pela metade de uma unidade hidroelétrica de Itaipu.

A projeção de mercado e oportunidades para o futuro são animadoras: o álcool deverá se internacionalizar; os problemas estruturais do complexo deverão ser melhor avaliados e modelados à luz da cadeia produtiva, em especial procurando-se uma coordenação mais articulada dessa cadeia e a cultura de cana-de-açúcar retomará a sua expansão e crescimento de produção para os próximos seis anos.

Dentro desse cenário em expansão, aliado ao alto patamar da produtividade, é necessário reduzir o custo de produção e otimizar o uso de insumos. Esses objetivos podem ser alcançados com a melhoria na previsão de resposta da cultura às práticas agrícolas. Essa previsão ecofisiológica da cultura de cana-de-açúcar pode ser obtida através de modelos matemáticos que expressam o conhecimento da cultura face aos fatores externos. Tais modelos têm as seguintes vantagens: assimilação do conhecimento obtido através de experimentos com menor custo; fornecimento de uma estrutura que promova colaboração interdisciplinar e interinstitucional (redes de pesquisa); promoção do uso do método científico na tomada de decisões em substituição à intuição (“achar que”); fornecimento de ferramentas dinâmicas e quantitativas que analisem a complexidade dos sistemas de culturas e o seu manejo, incluindo-se os fatores bióticos e abióticos; geração de cenários, por simulação, em situações não testadas experimentalmente, entre outros.

O presente documento é parte de um estudo amplo, na busca de se obter ferramentas matemáticas que sejam confiáveis e acessíveis aos produtores, para prever-se a produtividade e o crescimento da cana-de-açúcar.

José Gilberto Jardine
Chefe-Geral

Sumário

Introdução	9
Objetivos da construção de modelos matemáticos para cana-de-açúcar	11
Revisão de Literatura	11
Modelo, definição e classificação	11
Metodologia da modelagem matemática	13
Modelos matemáticos e softwares de simulação descritos para a cana-de-açúcar	15
Conclusões	22
Referências Bibliográficas	24

Levantamento de Modelos Matemáticos Aplicados à Cana-de-Açúcar

Fábio Cesar da Silva

Alessandra Fabíola Bergamasco

Introdução

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, cerca de 4,2 milhões de hectares (Matioli et al., 1998), participando com cerca de 25% da produção mundial, seguido pela Índia (20%) e China (6%). A produção brasileira concentra-se nas Regiões Sudeste e Nordeste. A primeira produz cerca de 65% da cana-de-açúcar brasileira; a segunda, 15% do total. O rendimento médio da cultura no país é baixo, não ultrapassando 68 t/ha. Os melhores níveis são alcançados nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste, que conseguem, em média, cerca de 75 t/ha.

Com a implantação do Proálcool, o maior programa de combustível renovável do mundo, a cultura da cana-de-açúcar passou a assumir papel ainda maior no aspecto social, econômico e ambiental. Só na área social, o Proálcool gerou em torno de 700 mil empregos diretos e 300 mil indiretos nas áreas rurais. É importante ressaltar que um dos fatores que tem permitido maior dinâmica na estrutura de produção de São Paulo, entre outros, é o apoio de uma eficiente estrutura de pesquisa diretamente e especificamente ligada a indústria açucareira.

A internacionalização do álcool deve ser um processo importante para o Brasil, pois há uma demanda potencial motivada por questões ambientais nos Estados Unidos, isto é, trata-se do "Clear Air Act" que muda a justificativa para seu uso, definindo o teor mínimo de renováveis no "pool" de combustíveis (1,5% até 2011) e banindo o uso de MTBE em nível nor-

te-americano em 4 anos. Deste modo, nos Estados Unidos, abriu-se um mercado de 25,7 bilhões de litros até 2005.

O manejo ambiental dessa cultura vem exigindo a previsão do comportamento em produção de biomassa energética e risco ambiental em vários níveis de controle na lavoura canavieira, desde formas de manipulação do solo, profundidade e densidade de plantio, irrigação, controle da maturação, pragas e doenças, etc.

Os processos fisiológicos da cana-de-açúcar, como fotossíntese e a assimilação de CO_2 , taxas de manutenção da respiração e partição do carbono para as partes das plantas, podem ser agregados através de equações matemáticas, resultando em modelos que podem simular o crescimento e o rendimento das culturas (Penning de Vries & Laar, 1982). Entretanto, esse processo de modelagem do crescimento da cultura de cana é gradual e lenta, pois depende do avanço do conhecimento no tema (Zambelo Junior, 1979).

Os Modelos Matemáticos possibilitam o estudo de sistemas reais complexos, os quais exigem modelos com integração coerente, banco de dados contendo informações experimentais e edafo-climáticas, além da previsão do potencial genético de cada variedade, isto é, permite-se prever as produtividades de variedades de cana-de-açúcar previamente calibradas em ensaios de campo em alocações em vários ambientes. Bassanezi & Ferreira Junior (1988), definem Modelo Matemático como um sistema de equações obtido da análise e abstração de situações problemas com a devida escolha das variáveis e suas relações.

A informatização de processos de suporte a decisões, em especial pelo emprego de Modelos Matemáticos, podem minimizar riscos ambientais, reduzir custos de produção e proporcionar maior sustentabilidade do planejamento agrícola. Esses modelos têm contribuído para um melhor conhecimento dos mecanismos fisiológicos da cultura, devido essa modelagem ser evoluída de forma acumulativa e gradual na medida em que avança a experimentação agrícola. Deste modo, conhece-se melhor os parâmetros mais importantes relacionados à operação de plantio.

Objetivos da construção de modelos matemáticos para a cana-de-açúcar

- Agregar os conhecimentos gerados nos ensaios de campo na forma de um modelo matemático e permitir uma colaboração interdisciplinar.
- Estimativa de crescimento e rendimento agrícola potencial através de simulações.
- Descrição do comportamento de elementos (metais e nutrientes), ao longo do caminho solo-raiz-parte aérea da cana-de-açúcar.
- Visualização das melhores alternativas de manejo e de uso do solo, de aplicações de insumos na lavoura sobre a produtividade da cana-de-açúcar, considerando-se a análise de seus impactos ambientais, utilizando-se de antevisão via a criação de vários cenários possíveis, tudo isso a um baixo custo e em tempo reduzido.
- Os modelos permitem ainda, simulação de situações de gerenciamento agrícola que tem atuação sobre fatores relevantes à produtividade do canavial, e assim, controlá-los da melhor maneira possível.
- Os modelos existentes podem também, serem associados a outros modelos, chegando ainda mais perto da realidade da produção da cana-de-açúcar.

Revisão de Literatura

Modelo, definição e classificação

De um modo geral, um modelo é a representação de um sistema em determinada forma de linguagem, não necessariamente a linguagem matemática. A escolha da forma de descrição mais fidedigna à representação pretendida do sistema está diretamente associada aos interesses envolvidos no estudo por modelagem. Os modelos podem ser:

- Modelos conceituais: apresentam de forma objetiva, clara e ordenada as considerações pertinentes a um problema em estudo. Através dele é

possível uma visão holística do problema, relacionando as várias áreas do conhecimento envolvidas na sua descrição. Os requisitos básicos para sua elaboração são: conhecimento amplo do assunto, clareza e objetividade da finalidade de elaboração do modelo e da definição das variáveis a serem representadas (Pessoa et al., 1997). Os modelos conceituais é a fase primordial para estruturar o conhecimento científico sobre os processos envolvidos no crescimento das culturas. Quando esse modelo conceitual converte-se em forma matemática é dito mecanístico ou baseado em mecanismo.

- Modelos físicos: são modelos de sistemas de produção, relativamente rígidos, que respeitam as condições dentro das quais foi formulada sua proposta prática. Neles, geralmente se mantêm escalas proporcionais a do sistema real. A partir desses modelos, projetados teoricamente mas possuidores de hipóteses claramente definidas, permitem-se identificar possíveis problemas do sistema real (Workshop ..., 1994).
- Modelos matemáticos: são descrições construídas em linguagem matemática, mediante simplificações do sistema (Engel, 1984), sendo representados por: componentes, variáveis, parâmetros e relações funcionais (Naylor et al., 1977), e podem ser classificados em:
 - a) Modelos determinísticos: também conhecidos como não probabilísticos, não permitem que as variáveis sejam aleatórias, além disso, suas características operacionais devem ser relações exatas, e não funções de densidade de probabilidade (Naylor et al., 1977).
 - b) Modelos estáticos: estes modelos não levam em conta a atuação da variável tempo em nenhuma das entidades do sistema. Na maioria das vezes são completamente determinísticos, com soluções normalmente obtidas diretamente da utilização de técnicas analíticas. As variáveis que definem o sistema não são dependentes do tempo e nem do espaço (Pessoa et al., 1997). Os modelos estatísticos são considerados empíricos, pois vem de um conjunto de dados experimentais que submete-se à teste e baseado em probabilidade.

- c) Modelos estocásticos ou probabilísticos: possuem pelo menos uma de suas características operacionais dada por uma função de probabilidade. São consideravelmente mais complexos que os determinísticos, pois descrevem processos aleatórios, como a distribuição espacial de indivíduos.
- d) Modelos dinâmicos: as variáveis modificam-se com o tempo, tornando-o um fator de grande importância na sua representação. Nesses modelos, o tempo é representado de duas formas, discreta ou contínua (Pessoa et al., 1997).

As características próprias de cada elemento do sistema, as quais individualizam e, portanto, o diferenciam de outros elementos, recebem o nome de atributos, que podem ser divididos em parâmetros e variáveis. Parâmetros, geralmente são valores constantes, previamente estabelecidos para o funcionamento do sistema (Pessoa, 1994). Variáveis são atributos necessários para descrever as interações entre as entidades do sistema, relacionando um componente a outro. Podem descrever entidades ou variáveis auxiliares aos cálculos necessários. Recebem esse nome porque podem sofrer alterações nos valores das entidades que representam (Pessoa et al., 1997).

Metodologia da modelagem matemática

Para permitir um manejo varietal direcionado é de importância vital possuir um adequado conhecimento do comportamento agrícola e tecnológico das variedades comerciais exploradas (Tsuji et al., 1993). O uso de banco de dados possibilita o armazenamento estável de vários indicadores que permitem conhecer com precisão e agilidade as complexas interações dos diversos fatores responsáveis pelos processos de crescimento vegetativo e maturação da cana-de-açúcar: variedade, solo, clima, nível de adubação, época de corte, manejo, estado de sanidade da cultura, etc.

A metodologia proposta por Bassanezi & Ferreira Junior (1988) para o processo de modelagem matemática, aborda inicialmente o estudo de problemas e situações reais buscando um tema de grande relevância, a partir desse estudo, a modelagem matemática é usada como linguagem para compreensão, simplificação e resolução desse sistema complexo, através da devida escolha das variáveis e suas relações; e formulação de hipóteses ou "leis", baseadas em conhecimentos de fenômenos análogos anteriores, visando uma possível tomada de decisão com relação ao problema levantado, entendendo da melhor maneira possível o fenômeno biológico. A substituição de linguagem natural por uma linguagem matemática específica é a fase da resolução, e seu estudo depende da complexidade do modelo, e se os argumentos conhecidos não são eficientes podem ser criados novos métodos, ou reformulados os modelos.

Para aceitação ou negação do modelo inicial existe a fase da validação, que consiste na comparação da solução obtida via Resolução do Modelo com os dados reais, obtidos através de experimentos (Bassanezi & Ferreira Junior, 1988). O grau de aproximação desejado deve ser o fator preponderante na decisão, e o principal obstáculo para a aceitação de um modelo é sua praticidade, ele deve envolver novos resultados práticos e justificar as hipóteses ou intuições. A busca do aperfeiçoamento dos modelos propostos é o que dinamiza a modelagem.

Após a aceitação do Modelo ele será aplicado na situação real para fazer previsões, tomar decisões, explicar e entender o fenômeno numa linguagem universal, enfim, participar do processo com capacidade de influenciar em suas mudanças.

Segundo Tsuji et al. (1994) ao se ajustar modelos os seguintes cuidados devem ser levados em conta: os experimentos de campo e de laboratório devem obedecer critérios estatísticos rigorosos para evitar erros que poderiam comprometer os resultados das simulações; efetuar controle de qualidade, envolvendo a análise prévia no tratamento dos dados; observar critérios estatísticos para o teste de modelos incluindo: análise de variância e teste F, análise gráfica de resíduos, coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e erro padrão da estimativa (S_{yx}).

Na etapa de teste do modelo ou validação, segundo Tsuji et al. (1994), os modelos ajustados devem ter sua eficiência testada com dados de outros experimentos que não compuseram o conjunto de valores utilizados nos ajustes e, também, com dados de plantios comerciais. Assim, pode-se verificar sua precisão e acurácia inclusive para outras regiões. Está incluída neste item a comparação de equações ajustadas para locais e épocas diferentes. Recomenda-se para a eficiência do processo: observar critérios estatísticos que envolvam a análise dos resíduos, obtidos através da diferença entre os valores observados nos novos experimentos e os valores estimados pelos modelos ajustados baseados nos experimentos originais; aplicar, além dos métodos utilizados para a avaliação do ajuste de modelos, testes mencionados no ítem anterior, ferramentas não paramétricas como o teste de Kolmogorov-Smirnov e teste de X^2 ; se for o caso de se comparar equações baseadas em um mesmo modelo, mas ajustadas em épocas ou locais diferentes recomenda-se testes de paralelismo e coincidência.

Modelos matemáticos e softwares de simulação descritos para a cana-de-açúcar

- a) DSSAT "Decision Support System for Agrotechnology Transfer" - descrito por ICASA (2001) - International Consortium for Agricultural Systems Applications, Honolulu, USA

O software de simulação numérica DSSAT é um poderoso instrumento para fazer previsões de crescimento das culturas e de estimativa de suas produtividades, tomando por base dados climáticos, teores de nutrientes e balanço de água no solo, cujo módulo referente à cana-de-açúcar é o modelo CANEGRO. Todos os modelos desenvolvidos e inseridos no software DSSAT se enquadram na categoria de modelos de mecanismos (Jones et al., 1987), que ao contrário dos empíricos, fundamentam-se no conhecimento que detalham e selecionam os processos chaves envolvidos no sistema solo-planta-água (Barber & Cushman, 1981). O DSSAT 3.5

possui 16 módulos de culturas distribuídos da seguinte forma: gramíneas (trigo, cevada, milho, milheto e sorgo); arroz; leguminosas (soja, feijão, amendoim e grão-de-bico); raízes e tubérculos (mandioca e batata); vários (cana de açúcar, tomate, pastagem e girassol).

Os dados de clima mínimos necessários para os modelos incluídos no DSSAT são: radiação solar (ou horas de brilho solar), importante para uma estimativa precisa da fotossíntese e evapotranspiração; temperatura do ar (máxima e mínima), importante na determinação da taxa de crescimento da planta e auxiliando na avaliação de estresses a extremos de temperatura e a outros processos de solo e planta e precipitação (principal suprimento de água para as culturas).

Os dados de solos necessários para os modelos incluídos no DSSAT são: classe, cor, albedo, evaporação, drenagem, escoamento superficial, mineralização, fertilidade (pH, nutrientes); além de dados de localização, latitude, altitude e longitude.

b) Modelo CANEGRO - descrito por Inman-Bamber (1993)

O modelo CANEGRO do software DSSAT é um híbrido do CERES com o CROPGRO, e simula a fisiologia, dinâmica de populações e relações hídricas na planta, existindo 3 opções para cálculo da evapotranspiração potencial. O modelo requer para os cálculos a velocidade diária do vento, temperatura, além de outros exigidos pelo DSSAT. O CANEGRO não simula o balanço do nitrogênio do solo e o carbono orgânico, verifica somente os estádios de crescimento vegetativo, não avaliando as datas de florescimento e maturidade.

Um esboço do modelo CANEGRO é dado na Fig. 1, que mostra que carbono, energia e água que encontram-se demonstrados dentro de 3 balanços separados. As trocas importantes entre esses três balanços ocorrem na relação da água da raiz/solo (A) e na relação dossel/atmosfera (B). O estresse hídrico ocorre quando a quantidade de água requerida para equilibrar o balanço de energia excedem a quantidade que as raízes podem absorver. O dossel é envolvido em todos os três balanços.

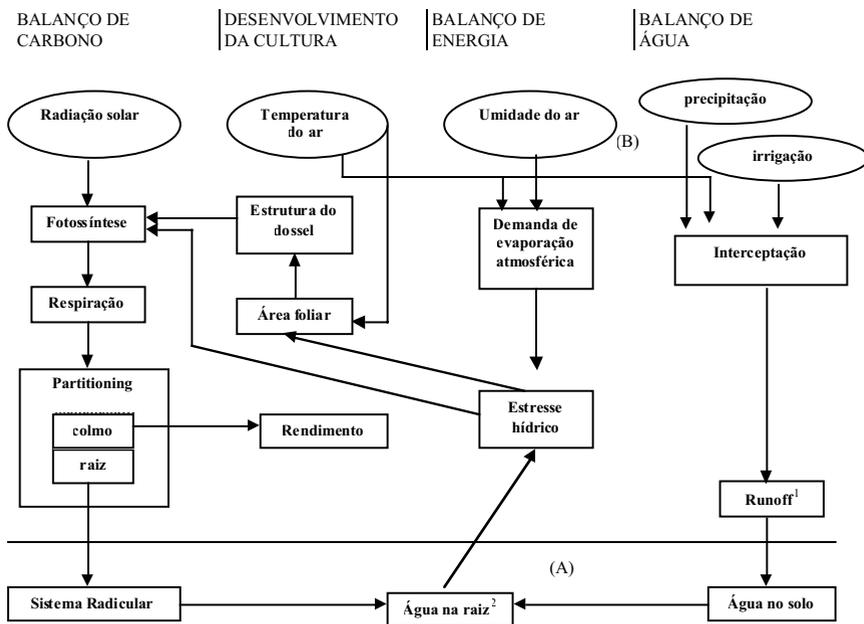


Fig. 1. Fluxograma do modelo CANEGRO.

Fonte: Inman-Bamber (1993).

c) Modelo Matemático-Fisiológico de estimativa de produtividade - descrito por Barbieri (1993)

Esse modelo utilizou medidas regulares do componente clima para fornecer informações sobre o desempenho da cultura, especialmente o acúmulo de matéria seca durante o ciclo. Os resultados desse estudo consideraram um conjunto de critérios e funções requeridas para prever a evolução temporal dos estádios fenológicos tais como: a germinação e estabelecimento, a formação do aparato fotoassimilatório (folhas), a renovação das folhas (formação de palha), a morte dos colmos por competição, e o acúmulo de matéria seca considerando as variações da fotossíntese e da respiração. Os elementos do clima utilizados foram insolação e temperatura do ar, juntamente com dados astronômicos como fotoperíodo e a radiação no topo da atmosfera. A disponibilidade de água foi considerada ideal, pois o modelo simula a produção potencial.

O modelo é composto de uma série de equações que descrevem o comportamento fisiológico da planta em resposta às condições ambientais, sendo que as constantes das equações foram obtidas adaptando-se os resultados de pesquisas disponíveis na literatura. A equação de acúmulo potencial da matéria seca, foi:

$$MST = MS_0 \cdot Cr^N + \overline{MS} \cdot \frac{(Cr^N - 1)}{(Cr - 1)}$$

MST = matéria seca acumulada no fim do mês em questão (kg/ha);

MS₀ = matéria seca existente no início do mês (kg/ha)

MS = matéria seca média mensal produzida por dia (kg/ha)

N = número de dias no mês

Cr = Coeficiente de respiração de manutenção (termo subtrativo)

Cr = 1 - r max . Cr (t) . Cr (i), onde:

r max = respiração máxima

Cr (t) = correção da r max em função da temperatura

Cr (i) = correção da r max em função da idade da planta

d) Modelo Matemático de Balanço de Carbono - descrito por Pereira (1987)

Pereira (1987) descreveu um modelo matemático-fisiológico para simular diariamente o balanço de carbono de uma comunidade vegetal (simula uma condição média da cultura, e não de plantas individuais), cujo modelo utiliza conceitos de respiração de crescimento e de manutenção, integrando-os com a fotossíntese no processo de crescimento da cultura, simulando a massa seca dos colmos e das folhas, especulando-se, de maneira quantitativa, os destinos do carbono após sua fixação pelas plantas, numa cultura de cana-de-açúcar.

Esse autor integrou três processos que normalmente são estudados em separado: crescimento, fotossíntese e respiração, em uma única equação, em torno da qual foi idealizado o modelo matemático do crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, cuja equação é:

$$\Delta W/\Delta t = Y_x (Fb - \Delta Sm/\Delta t), \text{ onde:}$$

ΔW = fitomassa, e $\Delta W/\Delta t$ = taxa de crescimento da planta

Y = eficiência de conversão

Fb = fotossíntese bruta

$\Delta Sm/\Delta t$ = taxa de respiração de manutenção

Foi construída uma equação de ajuste (F_i) que corrige o valor de F_b para níveis reais compatíveis com as condições reinantes durante o dia considerado:

$F_i = FRAD \times FTEMP \times FIAF \times FIDADE \times FUR$, onde:

FRAD = fator radiação solar

FTEMP = fator temperatura; $FTEMP = 0,053 T_1 - 0,59$, onde $t_1 = (2T_{max} + T_{min})/3$

FIAF = fator índice de área foliar; $FIAF = EXP(0,131 - 0,14 IAF)$

FIDADE = fator idade da cultura; $FIDADE = EXP(0,0881 - 0,891 XIDADE)$,

onde

XIDADE = relação entre a idade da cultura e o período plantio- colheita

FUR = fator umidade relativa; $FUR = 0,01UR$, onde UR = umidade relativa

Então, a equação para estimar a taxa diária de fotossíntese bruta (F_b) da cultura, foi:

$F_b = F_{bmax} \times IAF \times FLUZ \times F_i$, onde:

F_{bmax} = representa a taxa máxima possível para a cultura de fotossíntese bruta

IAF = índice de área foliar da cultura e representa o tamanho do aparelho fotossintetizante

FLUZ = é a razão entre o comprimento do dia e da noite

F_i = representa os fatores de ajustamento

e) Modelo de acúmulo de matéria seca - descrito por Inmar-Bamber & Thompson (1989) - South African Sugar Association Experiment Station

Foram utilizados dois modelos para entender os efeitos da idade e do clima na produção de matéria seca da cana-de-açúcar, utilizando-se água e fertilizantes em quantidades adequadas. Os modelos de respiração e fotossíntese foram desenvolvidos baseados em considerações obtidas na literatura, sendo o primeiro, descrito por Lorber et al. (1984), chamado de "The Lorber model":

$dW/dt = (Pg - (Rm \cdot W)) \cdot (1 - Rgr)$, onde

dW = total de massa seca da cultura incluindo a raiz (t/ha)

dt = intervalo de tempo

Pg = fotossíntese bruta (t CH₂O/ha)

Rgr = respiração de crescimento, cujo valor utilizado foi de 0,242 g/g

Rm = respiração de manutenção, cujo valor utilizado foi de 0,003 g/g

Sendo que,

$Pg = \epsilon \cdot L_i \cdot PAR$ e $L_i = 1 - e^{-k \cdot LAI}$, onde:

ϵ = eficiência da fotossíntese bruta

PAR = escala de radiação fotossintética ativa

LAI = índice de área foliar

K = coeficiente (variou de 0,4 a 0,7 de acordo com Jones (1985))

O segundo modelo, chamado "Glover model", é a combinação do modelo de respiração de Glover (1972), com o modelo de fotossíntese CERES-MAIZE (Jones & Kiniry, 1986), cujo modelo resultante é o seguinte:

$$Q_t = 1 - 0,0025 ((0,25T_{min} + 0,75 T_{max}) - 26)^2$$

Q_t = coeficiente de estresse de temperatura

T_{min} = temperatura mínima

T_{max} = temperatura máxima

Esse modelo demonstrou um decréscimo linear partindo de 8,8% (máxima eficiência fotossintética assumida) até 6,2%, entre as idades da cultura de 6 e 15 meses de acordo com os dados estudados (Kortschak & Forbes, 1969).

Inmar-Bamber & Thompson (1989) concluíram que os modelos apresentaram resultados satisfatórios de acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar irrigada da África do Sul, baseado em medidas de radiação e temperatura. O modelo de Lorber (Lorber et al., 1984) está sendo, atualmente, preferido ao modelo de Glover (Glover, 1972), devido ao fato de fornecer dados mais aproximados às medidas de campo e também, devido ao fato de ser mais simples.

- f) Modelos de Estruturas Modulares - descrito por Porter et al. (2001)
 - International Consortium for Agricultural Systems Applications
 - ICASA, Honolulu, USA

Tentando desenvolver ou identificar um modelo mais eficaz, foram adicionados componentes novos aos modelos de crescimento de culturas com o objetivo de expandir potencialidades, tornando estes, cada vez mais complexos. Isto gerou a necessidade de uma estrutura modular para os modelos das culturas de tal forma que os novos componentes pudessem ser adicionados, modificados e mantidos com esforços mínimos.

Esta aproximação modular permite:

- facilidade e habilidade de integrar o conhecimento das diferentes áreas de conhecimento (climatologia, solos, fisiologia vegetal, entre outras), melhorando assim a potencialidade da predição dos modelos;

- contribuições de muitos autores;
- flexibilidade maior nos modelos, com os módulos que estão sendo adicionados, modificados ou substituídos com pouco impacto ao programa principal ou a outros módulos;
- extensão da vida e da utilidade dos modelos de simulação.

O desenvolvimento do modelo modular apresentado é baseado nos métodos reportados por Kraalingen (1995) e usados extensivamente nos modelos de FSE/FST desenvolvidos por pesquisadores da Universidade de Agricultura de Wageningen. Foi adaptado pela Universidade da Flórida e usado para descrever modelos em Fortran e nas outras linguagens de computador. Esse estudo está sendo usado para reprogramar e documentar o modelo CROPGRO, o que inclui a aplicação dos módulos para a fisiologia, balanço de água no solo, crescimento da cultura, tempo, balanço da matéria orgânica no solo e do nitrogênio e danos dos pesticidas.

- g) Modelo Compartimental de Transferência de metais pesados no sistema solo-cana-de-açúcar sob adubação de composto de lixo urbano - descrito por Silva et al. (2000) - Embrapa Informática Agropecuária

Foi construído um modelo matemático, com base nos modelos compartimentais, para descrever a transferência dos metais pesados durante o caminho: composto de lixo-solo-raiz-parte aérea da cana-de-açúcar, com o objetivo de encontrar soluções agronômicas para o problema do acúmulo de lixo urbano que está trazendo sérios riscos ambientais e sociais no Brasil, utilizando-o como adubo na cana-de-açúcar após sua compostagem.

O modelo proposto foi:

$$dM_1/dt = - \lambda. M_1 - \alpha. M_1$$

$$dM_2/dt = + \alpha. M_1 - \beta. M_2$$

$$dM_3/dt = + \beta. M_2$$

$M_1 \rightarrow$ concentração do metal pesado no solo no instante t

$M_2 \rightarrow$ concentração do metal pesado na raiz no instante t

$M_3 \rightarrow$ concentração do metal pesado na parte aérea da cana-de-açúcar no instante t

$\lambda \rightarrow$ velocidade do decaimento do metal pesado (taxa constante)

$\alpha \rightarrow$ taxa de translocação do metal do solo para a raiz (taxa de absorção da raiz)

$\beta \rightarrow$ taxa de translocação do metal da raiz à parte aérea (proporcional a taxa de absorção da raiz)

h) Modelo de Crescimento de Índice de Área Foliar (IAF) de cana-de-açúcar - descrito por Teruel (1995)

O primeiro passo para utilização deste modelo de crescimento com base no índice de área foliar foi o cálculo dos valores de graus-dia para cada período de 24 horas, através dos dados de temperaturas máximas, mínimas e temperatura base.

Ajustou-se os valores medidos à função:

$$Y = a * x^b * e^{cx}$$

Onde,

$Y =$ IAF no momento

$x = \sum \text{Graus-Dias}_{\text{cor}}$

a, b e $c =$ parâmetros de ajuste

Conclusões

Embora em outros países seja comum o uso de modelos matemáticos e simuladores na pesquisa agropecuária, no Brasil essa prática ainda é pouco utilizada, e segundo Pessoa et al. (1997) o descrédito no uso de modelos está associado a uma visão reducionista, imposta a sua fase de elaboração, descrevendo modelos que não refletem a realidade encontrada no campo; a falta de técnicas matemáticas mais apropriadas; e, a ausência de informações qualitativas e quantitativas disponíveis.

Os modelos aqui apresentados foram validados e podem ser usados na predição do comportamento da cana-de-açúcar, mas esses modelos são específicos para às condições em que foram experimentados. O modelo CANEGRO, que se encontra no software DSSAT, é um modelo mais amplo, que permite alterações nas condições ambientais, solo e genéticas, através de seu código fonte, mas ele precisa ser adaptado e validado por inúmeros dados resultantes de pesquisas, principalmente em condições brasileiras, pois, os poucos resultados produzidos no mundo são praticamente da Austrália e da África do Sul. As dificuldades são grandes pois o CANEGRO é limitado e deficiente em alguns pontos, além de serem poucos os pesquisadores que estudam modelagem em cana-de-açúcar no país.

Conclui-se, com o levantamento bibliográfico de modelagem aplicada à cana-de-açúcar, que as pesquisas nessa área estão crescendo, principalmente com o uso de modelos como ferramenta de auxílio na tomada de decisões. Esses modelos estão se tornando cada vez mais complexos através da incorporação de maior número de variáveis que interferem no sistema solo-cana, permitindo, assim, a obtenção de resultados cada vez mais reais, podendo, futuramente, serem extrapolados para outras situações, o que reduzirá tempo e custos com experimentos. Permitirá, ainda, a interinstitucionalidade e multidisciplinaridade das pesquisas, na obtenção de maior produtividade de cana, menores custos, menor risco ambiental, e maior produção de biomassa como geradora de energia.

Referências Bibliográficas

BARBER, S. A.; CUSHMAN, J. H. Nitrogen up take model for agronomic crops. In: ISKARDR, K. (Ed.). **Modeling waste water renovation – land treatment**. New York: Wiley Interscience, 1981. p. 382-409.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*):** um modelo matemático-fisiológico de estimativa. 1993. 142 f. Tese (Dourado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BASSANEZI, R. C.; FERREIRA JUNIOR, W. C. **Equações diferenciais com aplicações**. São Paulo: Ed. Harbra, 1988. 572 p.

CESAR, F. C.; VENDITE, L. L.; BERGAMASCO, A. F. **Definição de critérios e modelos para a utilização agrícola do composto de lixo urbano na cana-de-açúcar**. [Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2000]. 78 p. Relatório técnico da bolsa FAPESP de Capacitação Técnica Nível III (TT-3) – Processo n. 1999/07341-9.

ENGEL, A. B. **Introdução à biomatemática determinista dos sistemas ecológicos**. Campinas: CNMAC/Editora da UNICAMP, 1984. 173 p. (CNMAC. Minicurso, 6).

GLOVER, J. Practical theoretical assessments of sugarcane yield potential in Natal. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, v. 46, p. 138-141, 1972.

ICASA. Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Disponível em: <<http://www.icasanet.org/dssat/index.html>>. Acesso em: 21 jun. 2001.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugar cane. **Field Crops Research**, v. 36, p. 41-51, 1993.

INMAN-BAMBER, N. G.; THOMPSON, G. D. Models of dry matter accumulation by sugar-cane. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, v. 63, p. 212-216, 1989.

JONES, C. A. **C4 grasses and cereals: growth, development and stress response**. New York, John Wiley, 1985. 419 p.

JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **CERES - maize model: a simulation model of maize growth and development**. [S.I.]: Texas A & M University Press, 1986. 194 p.

JONES, J. W.; MISHOE, J. W.; BOOTE, K. L. Introduction to simulation and modeling. In: FOOD & FERTILIZER TECHNOLOGY CENTER. **The seminar/workshop on computer crop simulation and data base management for agrotechnology transfer**. Taiwan: FFTC/National Chung Hsing University/IBSNAT/USAID, 1987. 21 p. (FFTC. Technical Bulletin, 100).

KORTSCHAK, H. P.; FORBES, A. The effects of shade and age on the photosynthesis rate of sugarcane. **Prog. Photosynth. Res.**, v. 1, p. 383-387, 1969.

KRAALINGEN, D. W. G. van. **The FSE system for crop simulation, version 2.1: quantitative approaches in systems analysis report no. 1**. Wageningen: DLO Research Institute for Agrobiological and Soil Fertility, Production Ecology, 1995.

LORBER, M. N.; FLUCK, R. C.; MISHOE, J. W. A method for analysis of sugarcane (*Saccharum sp*) biomass production system. **Transactions of the American Society Agricultural Engineering**. v. 27, p. 146-158, 1984.

MATIOLI, C.S.; FRIZZONE, J.A.; PERES, F.C. Irrigação suplementar da cana-de-açúcar: modelo de análise de decisão para a região norte do Estado de São Paulo. **STAB**, Piracicaba, v. 17, n. , p. 42-45, 1998.

MATSUOKA, S. "Crack" do setor sucroalcooleiro. **STAB**, v. 18, n. 4, p. 22-23, 2000.

NAYLOR, T. H.; BALINTFY, J. L.; BURDICK, D. S.; KONG, C. **Técnicas de simulação em computadores**. São Paulo: Vozes, 1977. 402 p.

PENNING DE VRIES, F. W. T.; LAAR, H. H. van (Ed). **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: Pudoc, 1982. 309 p. (Simulation monographs).

PEREIRA, A. R. Simulação do crescimento e da produtividade. In: SIMPOSIO SOBRE O MANEJO DE AGUA NA AGRCULTURA, 1987, Campinas, SP. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 200-9.

PESSOA, M. C. P. Y. **Simulação e inteligência artificial aplicadas ao estudo da dinâmica populacional do bicudo do algodoeiro na região de Campinas/SP**. 1994. 320 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FERNANDES, E. N.; LIMA, M. A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1997. 83 p. (EMBRAPA-CNPMA. Documentos, 8).

PORTER, C. H.; BRAGA, R. P.; JONES, J. W. An approach for modular crop model development. Disponível em: <<http://www.icasanet.org/modular>>. Acesso em: 21 jun. 2001.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A.F.; VENDITE, L. L. Uso de modelos de transferência de metal pesado e de crescimento de cana-de-açúcar sob adubação de composto de lixo urbano. In: CONGRESSO E MOSTRA DE AGROINFORMÁTICA – INFOAGRO 2000, Ponta Grossa. **Anais**. Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa/Fundação ABC, 2000.

TERUEL, D. A. **Modelagem do índice de área foliar da cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos**. 1996. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. **DSSAT version 3**. Honolulu: University of Hawaii, 1994. 163 p.

WORKSHOP SOBRE MODELOS FISICOS DE SISTEMAS DE PRODUCAO, 1993, Juiz de Fora. **Desafios para a pesquisa de sistemas pecuários**. Coronel Pacheco: EMBRAPA-CNPGL-ADT, 1994. 78 p. Relatório da reunião.

ZAMBELLO JUNIOR, E. **Aplicação do sistema integrado de diagnose e recomendação para diferentes solos e épocas de amostragem foliar em soqueira de cana (*Saccharum spp*)**. 1979. 95 f. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Embrapa

Informática Agropecuária

**MINISTÉRIO DA AGRICULTURA,
PECUÁRIA E ABASTECIMENTO**

