Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006

Gustavo Luís de Carvalho

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Física do Ambiente Agrícola

Piracicaba
2009

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

Gustavo Luís de Carvalho
Geógrafo

Eficiência da produção agrícola da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras de 1990/1991 e 2005/2006

Orientador:

Prof. Dr. **FÁBIO RICARDO MARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Física do Ambiente Agrícola

Piracicaba
2009

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

Carvalho, Gustavo Luís de
Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006 / Gustavo Luís de Carvalho. - - Piracicaba, 2009.
118 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Análise de séries temporais 2. Cana-de-açúcar 3. Clima 4. Modelagem de dados 5. Produtividade 6. Solos I. Título

CDD 633.61
C331e

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

Dedico aos meus pais Winebaldo e Isilda, a minha esposa Giovanna, a estas pessoas que me ajudam na árdua e gratificante caminhada da vida. Ao Pai celestial por tudo, ao Senhor Jesus de Nazaré pela obra do calvário, e a pessoa do Espírito Santo por guiar e inspirar toda a minha vida.

“O princípio da ciência é o temor do Senhor” Pv 1.7.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Fábio Ricardo Marin, pela grande amizade, ensinos e acolhimento, compreensão e paciência, que me orientou em todos os passos.

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Angelocci, pela atenção, e todo auxílio em todas as coisas que foram necessárias a elaboração desta dissertação.

Aos meus pais pela fé neste trabalho e aos demais grandes empreendimentos da minha vida.

A minha esposa Giovanna e ao meu filho Vinicius por todo carinho e força.

Aos meus amigos, companheiros de “cúpula”, em especial ao Alex, Indriati, Anderson e ao Gabriel pela amizade em seu sentido mais puro.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas ESALQ – USP, bem como aos demais amigos e professores.

Ao Departamento de Ciências Exatas ESALQ – USP, que viabilizou este trabalho.

A Embrapa Informática Agropecuária, representada na pessoa de seu Chefe-Geral Eduardo Delgado Assad, pelo financiamento do trabalho e fornecimento de sua estrutura, além do material necessário e do apoio técnico para a realização deste trabalho.

Aos estudantes Felipe Augusto de Andrade Soares e Murilo dos Santos Vianna, assim como aos demais estagiários do Laboratório de Modelagem Agroambiental da Embrapa Informática Agropecuária, que têm parcela de grande contribuição a este trabalho.

E ao Todo-Poderoso que a tudo torna possível.

SUMÁRIO

RESUMO....9
ABSTRACT....11
1 INTRODUÇÃO....17
2 OBJETIVOS....21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA....23
3.1 Origem, classificação e importância socioeconômico da cana-de-açúcar no Brasil.23
3.2 Morfologia da cana-de-açúcar....24
3.2.1 Sistema radicular....24
3.2.2 Colmo....25
3.2.3 Inflorescência....28
3.2.4 Folha....29
3.3 Fenologia....30
3.3.1 Emergência....31
3.3.2 Fase de estabelecimento....32
3.3.3 Fase de desenvolvimento da cultura....33
3.3.4 Maturação....34
3.4 Sistema de produção....35
3.4.1 A cana planta e a soqueira....35
3.4.2 Cana de ano e cana de ano e meio....36
3.5 Condicionamento agrometoerológico da produtividade....37
3.5.1 Temperatura do ar....37
3.5.2 Radiação solar....40
3.5.3 Chuva, evapotranspiração e umidade do solo....42
3.6 Modelagem aplicada à cana-de-açúcar....46
3.6.1 Teoria geral dos modelos....46
3.6.2 Modelagem no contexto agrícola e da cana-de-açúcar....52
3.6.3 Os atuais modelos para a cana-de-açúcar....54
3.7 Análise espacial de dados geográficas aplicados à agricultura....60
4 MATERIAL E MÉTODOS....63
4.1 Descrições dos dados....63
4.2 Geração dos mapas de eficiência e ponderação da importância relativa do solo e clima....64
4.3 Estimativa da produtividade potencial (PP) da cana-de-açúcar....66
4.3.1 Cálculo da produtividade potencial bruta (PPB)....67
4.3.2 Coeficiente para índice de área foliar (Ciaf)....68
4.3.3 Correção da respiração (Cresp)....68
4.3.4 Índice de colheita (Ccol)....69
4.3.5 Coeficiente de umidade....69
4.4 Cálculo da produtividade atingível (PA)....70
4.4.1 Cálculo da Evapotranspiração Máxima da Cultura....70
4.5 Parametrização e validação do modelo....71
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO....75
5.1 Validação do Modelo....75
5.2 Análise da Produção Atingível e Produção Observada....76
5.4 Relação entre os elementos climáticos e a eficiência da produção agrícola....90

5.5 Relação entre o solo e a eficiência da produção agrícola..... 95
5.6 Relação entre os fatores conjunturais e a eficiência da produção agrícola 98
6 CONCLUSÕES..... 105
REFERÊNCIAS 107

RESUMO

Eficiência da produção agrícola da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras de 1990/1991 e 2005/2006

A cana-de-açúcar é uma realidade no papel de rentabilidade global e recurso energético capaz de auxiliar a economia de combustíveis fósseis, e nas novas diretrizes do desenvolvimento sócio-econômico com maior sustentabilidade. O Estado de São Paulo se apresenta como região de grande potencial para atender a demanda de cana-de-açúcar no que tange a produção de açúcar, etanol e energia, dada sua tradição no setor sucroalcooleiro, sua estrutura econômica, as tecnologias disponíveis e a infra-estrutura adequada. O objetivo do presente trabalho foi mapear a eficiência produtiva ao longo de 16 safras agrícolas, analisando a importância relativa do clima e do solo e inferindo sobre os aspectos socioeconômicos e conjunturais que interferem na composição da eficiência de produção de cana-de-açúcar e na sua variabilidade espaço-temporal. O conceito de eficiência de produção agrícola foi derivado a partir da termodinâmica para gerar um indicador para a avaliação do desempenho de sistemas de produção agrícola em escala local ou regional e quantificar como fatores determinantes interferem no sistema de produção. Em termodinâmica, eficiência de um processo é dada pela razão entre a energia obtida e o total utilizado para consecução do processo. Para estabelecer a relação com sistemas agrícolas, admitiu-se que a energia disponível pode ser dada pela produtividade atingível estimada por modelos de simulação, enquanto que a produtividade observada representaria a energia efetivamente utilizada no processo. Utilizou-se o Método das Zonas Agroecológicas da FAO para se determinar a produtividade potencial, ajustando-a em função do estresse hídrico pelo método de Jensen e do tipo de solo em função do conceito de ambiente de produção proposto por Prado. Antes da sua aplicação, o modelo foi parametrizado e validado em comparação com dados de campo. Os dados do IBGE foram tomados como produtividade observada, para avaliar a eficiência da produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, analisando a sua correlação como alguns fatores do meio físico podem influenciar sobre ela. Foi possível observar que os elementos climáticos explicaram 43% da variabilidade da eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar. Analisando os valores médios das 16 safras, obteve-se que os seguintes elementos climáticos afetam a eficiência de produção agrícola, em ordem de importância: radiação solar, deficiência hídrica, temperatura máxima, precipitação e temperatura mínima. Com relação ao solo observou-se que explica 15% da variabilidade da eficiência de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, na média de todas as safras. Analisando a variação temporal dessa correlação, notou-se uma alteração no padrão de correlação a partir da safra 2001/2002, provavelmente por causa da expansão da cultura para a região oeste do Estado no período subseqüente. O consumo de fertilizantes foi utilizado para subsidiar algumas inferências feitas nesse contexto. Em média, 42% da variabilidade da eficiência da produção de cana-de-açúcar foram explicadas por outros fatores, além do clima e do solo, inferindo-se a partir disso que aspectos socioeconômicos e conjunturais têm grande influência sobre a composição da eficiência

de produção de cana-de-açúcar, notadamente os preços pagos pelos derivados da cana-de-açúcar e a demanda pelo etanol no mercado interno.

Palavras – chave: Modelagem; Clima; Solo; Produtividade e variabilidade espaço-temporal

ABSTRACT

Sugarcane crop efficiency in the State of São Paulo between growing seasons of 1990/1991 and 2005/2006

The sugarcane is an important resource for food and energy production with scale to help the economy of fossil fuels and the development of new guidelines for socio-economic development in sustainable basis. The State of São Paulo is a region of great potential to meet the sugarcane demand in terms of sugar, ethanol and energy, since it has a long tradition related to this sector, its economic structure, the available technology and enough infrastructures. The objective of this study was mapping crop efficiency over 16 growing seasons, examining the relative importance of climate and soil and inferring on the socio-economic aspects interfering in the composition of the sugarcane crop efficiency and its spatial and temporal variability. The concept of crop efficiency was derived from the thermodynamics to generate an indicator for evaluating the performance of agricultural production systems in local or regional scale, and measure how factors affect the production system. In thermodynamics, efficiency of a process is given by the ratio between the total energy available and the amount of energy effectively used to achieve the process. To establish the relationship with agricultural systems, acknowledged that the available energy could be estimated by the attainable yield given by simulation models based on environmental variables, while the observed yield could represent the energy effectively used in the process. The method of Agroecological Zones of the FAO was applied to determine the potential yield, adjusting it according to water stress by the Jensen method and the soil constraints according to the concept of the production environment proposed by Prado. Before its implementation, the model was parameterized and validated by comparison with field data. Here, the IBGE's data were taken as observed yield, so then to assess the crop efficiency of sugarcane in the State of São Paulo, analyzing the factors influencing on it. It was observed that the climatic factors explained 43% of the variability of crop efficiency of sugarcane, based on the analysis of the average values from 16 growing seasons. Regarding this point, it was obtained that the following weather elements affect the efficiency of agricultural production, in order of importance: solar radiation, water deficit, maximum temperature, precipitation, and minimum temperature. Regarding the soil, it explained 15% of the variability of the sugarcane crop efficiency, also considering the average of all seasons. Analyzing the temporal variation of this correlation, it was noticed a change in the pattern of correlation from the 2001/2002 season, probably because of the crop expansion to the west of the state during the subsequent period. The consumption of fertilizer was used to support some inferences made in this context. On average, 42% of the variability of efficiency of production of sugarcane in the State of São Paulo was explained by other factors, besides the climate and soil. It was inferred that social and economic aspects have great influence on the composition of the crop efficiency of sugarcane, markedly the prices paid for sugarcane product and the ethanol demand in the internal market.

Keywords: Modelling; Climate; Soil; Yield; Spatial and temporal variability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da fenologia da cana-de-açúcar. Adaptado de Kuyper, 1952 apud Doorembos & Kassan (1979). 31
Figura 2 - Símbolos do modelo de compartimento adaptado de Forrester (1961). a) nível, b) taxa, c) fonte, d) variável auxiliar, e) caminho do fluxo de material, f) caminho do fluxo de informação. 52
Figura 3 - Modelo conceitual para estimativa da acúmulo de sacarose do CANEGRO (adaptado de Inman-Bamber & Kiker, 1997). 55
Figura 4 - Modelo conceitual utilizado no QCANE para estimativa do teor de sacarose (adaptado de Liu & Kingston, 1995). 56
Figura 5 - Modelo conceitual do APSIN-Sugarcane para estimativa do acúmulo de sacarose (adaptado de Keating et al., 1999). 58
Figura 6 - Aptidão agrícola das terras no Estado de São Paulo. Fonte: Ramos et al., (2007). 64
Figura 7 - Relação entre a produtividade estimada pelo modelo FAO-33 e a produtividade observada em condições de campo, sendo a) calibração empírica do modelo e b) a validação. 76
Figura 8 - Mapas de produtividade observada, gerados a partir de dados do IBGE, entre as safras de 1990/1991 e 2005/2006. 78
Figura 9 - Mapas de produtividade atingível, gerados a partir de estimativas do modelo proposto, entre as safras de 1990/1991 e 2005/2006. 80
Figura 10 - Variação da média de eficiência de produção agrícola da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo da safra de 1990/1991 a 2005/2006. 83
Figura 11 - Mapas de eficiência de produção agrícola no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006. 85
Figura 12 - Variação temporal da área (km^2) de cinco classes de eficiência de produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006. 88
Figura 13 - Contribuição relativa (%) de cada fator na determinação da eficiência média da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. 90

Figura 14 - Variação espacial da a) temperatura mínima (ºC), b) temperatura média (ºC), c) temperatura máxima (ºC), d) radiação solar global (MJ m^{-2} d^{-1}), e) precipitação (mm/ano) e e) deficiência hídrica (mm/ano), utilizando valores médios entre as safras 1990/1991 e 2005/2006. 91
Figura 15 - Variação temporal dos valores médios estaduais de a) precipitação (mm/ano), b) radiação solar global (MJ m^{-2} d^{-1}); c) deficiência hídrica (mm/ano), d) temperatura mínima e, e) temperatura máxima (ºC), entre as safras 1990/1991 e 2005/2006. 92
Figura 16 - Preços pagos em U$ pela saca de 50kg de açúcar, fertilizantes entregues ao consumidor final na Região Centro do Brasil (bilhões de toneladas) (Ferreira & Gonçalves, 2007) e a eficiência média de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. 96
Figura 17 - Variação da Produtividade Observada e Estimada ao longo das safras de 1990/1991 a 2005/2006. 99
Figura 18 - Preços pagos pela saca de 50kg de açúcar (em US$) e a eficiência média de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo..... 103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de correção para produtividade estimada em função do tipo de solo.64
Tabela 2 - Valores utilizados de índice de área foliar (IAF) coeficiente de cultivo (Kc) e os coeficientes de sensibilidade a seca (Ky) e (λ).....67
Tabela 3 - Datas de corte e colheita, tipo de cultivo e produtividade de colmo de cana-de-açúcar observada em condições de campo.....73
Tabela 4 - Valores médios de produtividade e de desvio padrão para os dados observados em condições de campo, estimados com o modelo sem ajuste e após o ajuste estatístico do modelo.....76
Tabela 5 - Eficiência média da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo da safra de 1990/1991 a 2005/2006. 83
Tabela 6 - Distribuição de área (km^2) em cinco classes de eficiência de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006.....87
Tabela 7 - Distribuição de área (%), normalizada em função da área total do Estado de São Paulo, em cinco classes de eficiência de produção de cana-de-açúcar entre as safras 1990/1991 e 2005/2006.....87
Tabela 8 - Valor médio em % da contribuição dos fatores que explicam a variabilidade da eficiência cana-de-açúcar do Estado de São Paulo do período de 1990 a 2006 para 637 municípios. 89
Tabela 9 - Valores médios e desvio padrão para as 16 safras (1990/1991 – 2005/2006) para a precipitação, radiação solar, deficiência hídrica, temperatura máxima e mínima.91
Tabela 10 - Coeficiente de Pearson (R^2) médio das 16 safras (1990/1991 – 2005/2006) para a precipitação, radiação solar, deficiência hídrica, temperatura máxima e mínima.93

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes na agricultura brasileira na atualidade, sendo componente histórico, econômico e cultural da formação sócio-política nacional, como um dos primeiros sistemas agrícolas para exportação. A cultura da cana-de-açúcar compõe um setor que movimenta grande montante de capital, tecnologia, pessoas e informação. Na safra de 2008/2009, por exemplo, a produção brasileira de cana-de-açúcar deve superar 578 milhões de toneladas, ocupando área de cerca de 8,9 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2008).

O Estado de São Paulo é o principal produtor nacional, empregando modernas técnicas de cultivo, transporte e processamento, que conferem altos níveis de produtividade no campo e na indústria. A partir da década de 1970, além do apelo alimentar historicamente associado à cultura, a cana-de-açúcar passou a figurar como alternativa econômica para a produção de energia em larga escala no Brasil, devido à forte elevação do preço do petróleo e às oportunidades advindas da co-geração de energia elétrica.

A partir do ano 2000, além da questão econômica, o etanol ganhou um apelo adicional como substituto parcial da gasolina reduzindo as emissões de dióxido de carbono oriundo, principalmente, do setor automotivo. Em termos de desenvolvimento sustentável, a Política Nacional do Meio Ambiente tem como diretriz principal a substituição dos derivados de petróleo por fontes alternativas de energia e o subsidio à execução de pesquisas nessa área.

O Brasil, atualmente, lidera tanto em volume de produção como em tecnologia associada à produção agrícola e industrial de etanol. Para manter-se nesta posição de liderança no médio e longo prazo, contudo, é necessário ampliar o conhecimento nas diversas áreas envolvidas na produção do etanol e, talvez, o mais carente de estudo, seja o setor agrícola, especialmente no que concerne a maximização do potencial produtivo das terras com mínimo impacto ambiental.

Uma dificuldade no estudo de sistemas de produção agrícola é estabelecer um indicador confiável que permita diagnosticar os sistemas produtivos regionais e

compará-los dentro de um mesmo critério de avaliação que envolva aspectos de clima, solo e fatores socioeconômicos. Nesse sentido, o adequado diagnóstico dos fatores determinantes de um sistema produtivo é útil na análise espacial de seu desempenho e que pode ser aplicada, por exemplo, na elaboração de mapas de zoneamento agrícola na medida em que permitem ponderar a importância de cada plano de informação que compõe a legenda do mapa final de zoneamento.

Além desse aspecto, sob o ponto de vista espacial, a compreensão das relações que definem o desenvolvimento ou a involução de um determinado setor produtivo numa dada região é também de suma importância para o estabelecimento de políticas públicas e estratégias corporativas que aumente as chances de sucesso do empreendimento agrícola.

O estabelecimento de indicadores de desempenho também possibilita a análise temporal dos fatores determinantes do desempenho de um dado setor, associando às variáveis do meio físico – normalmente contempladas neste tipo de análise - fatores sócio-econômicos que interferem na rentabilidade, no nível de investimento e conseqüentemente, na produtividade do sistema. Neste trabalho, preconiza-se que a definição de um indicador de desempenho de sistemas produtivos agrícolas pode subsidiar a melhor compreensão dos sistemas produtivos, identificando variáveis de maior importância e seu respectivo peso relativo. Esse indicador, também pode servir como material de estudo das relações entre os diferentes fatores do meio físico e sócio-econômico que definem o grau de desenvolvimento agrícola do setor canavieiro.

Neste trabalho, o conceito de eficiência agrícola foi utilizado como indicador do nível de desenvolvimento agrícola regional. A eficiência da produção agrícola a ser utilizada neste trabalho deriva do conceito termodinâmico de eficiência que, de maneira geral, pode ser entendido como uma representação da relação entre a energia efetivamente utilizada e a que é fornecida ao sistema.

Em agricultura, Monteith (1972, 1977) aplicou esse conceito admitindo que eficiência possa ser considerada como a razão entre a “saída” de energia na forma de carboidrato e a “entrada” de energia proveniente do sol. Para aplicação desse conceito em escala regional, Marin et al. (2008) propuseram que a eficiência da produção agrícola seja dada pela razão entre a produção observava em condições de campo e a

produtividade potencial estimada por modelos de simulação que consideram condições ótimas de cultivo, sob o ponto de vista climático, fitossanitário e nutricional. Com ela, objetiva-se quantificar qual a fração dos recursos ambientais disponíveis à produção agrícola que são utilizados efetivamente.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é mapear a eficiência da produção agrícola da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, ao longo de 16 safras agrícolas, entre os anos de 1990 a 2006, analisando-se a variabilidade espaço-temporal e buscando identificar seus fatores determinantes.

Os objetivos específicos são: 1) parametrizar e validar um modelo para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar na escala regional, considerando aspectos de clima e solo no Estado de São Paulo; 2) ponderar a importância relativa do solo, do clima e dos fatores sócio-econômicos na variabilidade espaço-temporal da eficiência de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Origem, classificação e importância socioeconômico da cana-de-açúcar no Brasil

Em 1753, ao elaborar seu sistema de classificação vegetal, Lineu[1] descreveu duas espécies de cana-de-açúcar: *Saccharum Officinarum* e *Sacharum Spicatum.* Atualmente, as espécies de cana-de-açúcar são classificadas como *S. officinarum, S. spontaneum, S. sinensis, S. barberi e S. robustum*, pertencentes à família *Poacea.*

Lineu indica também que as espécies estudadas eram originárias das Índias, onde seu uso já era feito desde 1500 a.C e desde os anos 300 a.C já era uma cultura com grande importância econômica (ARANHA; YAN, 1987). Há também indícios de que, neste período, a cana-de-açúcar também era utilizada na China (James, 2004), mas sua origem verdadeira tenha sido a Nova Guiné, onde foram encontrados registros com mais de 8000 anos.

As variedades derivadas da espécie *S. officinarum* foram denominadas como *Canas Nobres* pela primeira vez por pesquisadores alemães que estudavam a Ilha de Java nos anos 1920, porque continham maior teor de açúcar e menos fibras em relação às demais espécies.

Por volta do ano 300 d.C., Alexandre, o Grande, trouxe a cana-de-açúcar das Índias para a Europa e, as expedições européias entre 1450 e 1500 trouxeram as espécies às Américas, especialmente nas ilhas caribenhas e na América do Sul.

No Brasil, a cana chegou logo após o descobrimento, mas a cultura ganhou importância econômica a partir da segunda metade do século XVI, quando os engenhos do nordeste brasileiro passaram a operar em Pernambuco, Bahia, Alagoas, Sergipe e Paraíba. No século XVII, a produção de cana-de-açúcar se expandiu para o Pará e Amazonas (onde os engenhos orientaram-se para a produção de cachaça), chegando em seguida ao Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. Neste período, a cultura atendia perfeitamente à estratégia de Portugal, associando a ocupação intensa da colônia e a

---

[1] LINEU, C. **Species plantarum: exhibentes plantas rite cognitas, ad genera relatas, cum differentiis specificis, nominibus trivialibus, synonymis selectis, locis natalibus, secundum systema sexuale digestas**.. Holmiae: Impensis Laurentii Salvii, 1753. v. 1, 54 p.

produção de um item altamente lucrativo para a metrópole na Europa (CANABRAVA, 2005).

No século XIX, a expansão dos pólos produtores de açúcar pelo mundo reduziu a importância do Brasil no mercado mundial, comprometendo assim a viabilidade econômica da atividade do país. Neste período, São Paulo e Rio de Janeiro se firmaram como pólos fornecedores para as regiões Sul e Sudeste. Em 1933, foi criado o Instituto de Açúcar e Álcool, com a finalidade de regular a produção interna e desenvolver pesquisas sobre a cultura. Em 1973, com a primeira crise do petróleo, o Brasil inicia o Programa Nacional Álcool, com o objetivo de inserir o etanol na matriz energética brasileira.

Atualmente, a cana ocupa mais de 7 milhões de hectares, sendo o Brasil o maior produtor mundial, seguido por Índia, Tailândia e Austrália. O setor sucro-alcooleiro fatura R$40 bilhões por ano, direta e indiretamente, gerando mais de 3,6 milhões e reunindo cerca de 70 mil produtores (DIEESE - DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS, 2007). Na safra 2007-2008, o Brasil produziu cerca de 30 milhões de toneladas de açúcar e 22 bilhões de litros de etanol (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA, 2009).

3.2 Morfologia da cana-de-açúcar

3.2.1 Sistema radicular

A cana-de-açúcar possui um sistema radicular altamente ramificado do tipo fasciculado (Figura 1), melhor observado em sua parte superficial, sendo que 85% da massa total se encontram nos primeiros 50 cm e 60% nos primeiros 20-30 cm de forma orientadas para baixo em sentido vertical (SEGATO, 2006).

A distribuição das raízes declina de forma exponencial à medida que ela vai se aprofundando com valor máximo de densidade de aproximadamente 5 cm/cm^{-3}. Observações feitas a partir de 1930 sugeriram que a profundidade máxima da raiz poderia exceder 6 m, esta grande profundidade refere-se à capacidade que a planta tem de sobreviver a condições de escassez de água (SMITH, 2005).

O crescimento e a distribuição das raízes da cana-de-açúcar variam acentuadamente com a idade da planta. De um modo geral até o 6º mês o crescimento é lento aumentando rapidamente até o desenvolvimento máximo, que está em torno do 12º mês (PARANHOS, 1987).

Segundo os resultados de Inforzato e Alvares (1957), a cana pode acumular cerca de 1,8 t ha^{-1} de raízes até o 6º mês, sendo que 41% deste total encontram-se na camada até 30 cm de profundidade e mais 30% nas camadas entre 30 e 90 cm mais 29% nas camadas entre 90 e 210 cm. Neste mesmo estudo, verificou-se que no 12º mês a raiz atingiu o seu valor máximo de crescimento chegando a 8t ha^{-1} sendo que 71% de seu total encontravam na região dos primeiros 30 cm de profundidade, sendo que depois desta época a quantidade de raiz diminuiu progressivamente (PARANHOS, 1987).

Para Rostron (1974), em torno do 7º mês, cerca de 17% de toda matéria seca acumulada pela cana corresponde à massa radicular, mas tal participação decresce gradativamente com a idade da planta. Isso indica que no período inicial de desenvolvimento da cana uma boa parte da energia é utilizada no crescimento das raízes e também que o padrão de distribuição da matéria seca entre a parte aérea e a parte radicular pode variar também em função das condições ambientais. Como observado por Silveira (1980), a deficiência de nitrogênio na planta prioriza o desenvolvimento das raízes em relação à parte aérea (PARANHOS, 1987).

Em solo argiloso, por exemplo, Thompson (1976) encontrou para uma cultura irrigada de cana que as raízes absorvem água até 90 cm, enquanto que em condições não irrigada a profundidade atingiu 1,2 m em solos arenosos. Nesse mesmo trabalho foram constatadas em cultura de cana sem irrigação que as raízes atingiram mais de 4m de profundidade, com absorção significativa de água em até 1,8m de profundidade.

3.2.2 Colmo

O colmo da cana constitui-se num reservatório onde, em condições favoráveis a maturação, ocorre o acumulo de grande quantidade de sacarose. O colmo da cana é composto por sucessões de internós em diferentes estágios fisiológicos, emitidos em intervalos de aproximadamente 10 dias (GLASZIOU et al., 1965). Os internós imaturos

localizados na região do colmo com folhas verdes são fibrosos com altas concentrações de hexoses e baixa concentração de sacarose.

À medida que estes internós desenvolvem-se, sua taxa de crescimento diminui até ser nula, quando o mesmo amadurece. Durante o crescimento, o teor de sacarose é maior nos internós basais e menor conforme se aproxima do ápice da planta. A taxa de acúmulo de sacarose é maior durante a última fase do ciclo da cana, quando a planta tem pequena taxa de crescimento, coincidindo com o período de restrição climática que induz a maturação (MACHADO, 1987).

Sabe-se que a parte da biomassa total que pertence ao colmo ou fração do colmo, aumenta com o aumento da biomassa (ROBERTSON et al., 1996; INMAN-BAMBER et al., 2002). Esta fração é zero antes do início do crescimento do colmo, atingindo seu valor máximo quando a cultura esta na maturação, esta fração é afetada diretamente pelo estresse hídrico, temperatura e tipo de cultivar (INMAN-BAMBER et al., 2002). Os valores da fração do colmo para culturas maduras têm grande variabilidade de citações na literatura, sendo o resultado de diferentes métodos de se mensurar estes valores, bem como o da biomassa.

Quando os valores determinados excluem a parte não aproveitável da cana-de-açúcar (palha), a escala de valores para o colmo varia de 59% a 73%. No modelo APSIM (KEATING et al., 1999a), considera-se como constante o valor de 70% da planta colhida (excluindo-se a palha) para a fração do colmo. O modelo apresentado por Liu e Bull (2001), inclui um conjunto de equações para descrever a temperatura como fator de controle da partição de matéria seca. O maior efeito sobre as culturas maduras é para temperatura abaixo de 16ºC, a fração da partição para o colmo para 16ºC é de 41%, mas quando esta temperatura cai a 10ºC, esta fração da biomassa total destinada ao colmo aumenta para 61%, correspondendo ao decréscimo na fração de partição para as folhas e meristema. A partição para a raiz decresce ligeiramente com o aumento da temperatura (LIU; BULL, 2001).

O teor de sacarose do colmo varia de acordo com a época de colheita, assim como também com a idade da cultura, estresse hídrico e tipo de cultivar. O índice de sacarose é mais elevado no inverno, onde mais sacarose é acumulada por causa da

redução dos processos de crescimento de folhas e fibras (SINGELS; DONALDSON; SMIT, 2005).

A demanda de crescimento para o colmo e para a folha tem mais prioridade para a planta do que o aumento do índice de sacarose, e este processo é regulado pela temperatura, estresse hídrico e nitrogênio. Quando os assimilados estão disponíveis para suprir todos os dissipadores, a sacarose é acumulada no colmo de acordo com os coeficientes específicos do cultivar (SINGELS; DONALDSON; SMIT, 2005).

Em resumo, colmo é constituído pelos chamados nós e entrenós formando gomos. Nos nós a planta insere a bainha da folha e a zona radicular, nesta região inclui-se a gema e os primórdios das raízes. Na região do meristema intercalar, as células sofrem divisão celular capaz de alongar o entrenó.

O colmo é uma estrutura capaz de suportar as folhas e as partes florais, além de conduzir água e nutrientes do solo para as folhas e também translocar os alimentos sintetizados para outras partes da planta.

Do ponto de vista econômico, a propriedade mais interessante do colmo consiste em armazenar açúcar e outros materiais, o açúcar é armazenado nas células do parênquima, além do parênquima ainda há feixes fibrovasculares e os feixes fibrosos do córtex compondo os três elementos mais importantes do colmo.

Para o aproveitamento econômico, considera-se que o colmo é composto de 25% de partes duras e de 75 % de partes moles. O teor de fibras da parte dura esta em torno de 75% e o caldo em 25% equivalendo 20% do caldo total do colmo, nas partes moles, encontra-se 80% do restante do caldo da planta, dos quais 8% de fibras e 92% de caldo.

A quantidade de caldo extraído da cana-de-açúcar depende em muito da tecnologia de moagem, que necessariamente tem que extrair caldo tanto das partes duras como das partes moles, nas partes moles existe maior concentração de açúcar do que nas partes duras, a distribuição de açúcares ao longo do colmo é dado pelo brix, que representa a concentração de sólidos dissolvidos no caldo (GODOY, 2007).

3.2.3 Inflorescência

A inflorescência da cana-de-açúcar é em forma de panícula de tamanho que varia muito de cultivar. A inflorescência possui tecido seco isento de caldo, por isso ela não é moída junto com o colmo, pois aumentaria o bagaço e absorveria caldo diminuindo o rendimento total da planta.

A inflorescência causa um processo chamado isoporização do colmo, capaz de tornar o colmo mais fibroso e com menos caldo e açúcares, resultando em perda de produtividade, por isso em sistemas agrícolas comerciais para aplacar este problema utiliza-se a aplicação de maturadores e normalmente inicia-se a colheita quando há condições de inicio deste processo.

Segundo Stevenson (1965), o florescimento normalmente ocorre após o solstício de verão, com fotoperíodo entre 12h e 12,5h e temperatura noturna acima de 18ºC, enquanto Bull e Glasziou (1975) estabeleceram a necessidade de, pelo menos, 10 dias nestas condições para desencadear o florescimento.

Daí, uma regra quase geral é a que estabelece que, no hemisfério sul o estímulo e diferenciação meristemática para a formação da flor ocorrerá nos meses de fevereiro, março e abril, dando-se o florescimento nos meses de abril, maio e junho. Já para o hemisfério norte a diferenciação ocorreria em agosto, setembro e outubro, com a conseqüente floração de outubro a janeiro (Rodrigues, 1995).

No mesmo sentido, Berding et al. (2005) postulam que as condições para a ocorrência do florescimento são temperatura noturna acima de 21ºC e tendência de redução do fotoperíodo, enquanto Alfonsi et al. (1987) estabeleceram também que, além do fotoperíodo e da temperatura do ar, a boa disponibilidade de água no solo também é favorável ao florescimento Quando há o interesse no florescimento, contudo, Brett (1951) ressalta que o frio prejudica a iniciação floral e o desenvolvimento da espigueta, reduzindo a fertilidade do pólen.

A ocorrência de florescimento, segundo Pereira et al. (1983) é dependente das condições de umidade do solo, fotoperíodo e temperatura do ar. Para a variedade NA56-79, os autores constaram que o florescimento pode ser previsto pela contagem do número de dias com temperatura mínimas acima de 18ºC e máximas abaixo de 31ºC, no período que vai de 25 de fevereiro até 20 de março, como segue:

$$IF = 1{,}263 - 0{,}06764 \cdot X_1 - 0{,}02296 \cdot X_2$$

(1)

em que: IF é um indicador da probabilidade de ocorrer o florescimento, sendo que para IF=0, há 50% de probabilidade de o florescimento ocorrer; para IF<0 o florescimento deve ocorrer e, para IF>0, não haverá florescimento.

3.2.4 Folha

Na cana-de-açúcar, a síntese da sacarose é realizada inicialmente nas folhas pela ação de enzimas sintetizantes. A sacarose formada é transportada até os colmos e distribuídas lateralmente, por difusão através da parede celular para diferentes células do parênquima de armazenamento. Sob estresse hídrico ocorre a diminuição das atividades enzimáticas, favorecendo a liberação de enzimas específicas que atuam no processo de acúmulo de teor de açúcar nos colmos (PARANHOS apud MACHADO, 1987).

A folha da cana-de-açúcar é constituída de duas partes, a saber: a bainha e a folha propriamente dita, a distribuição das folhas no colmo é de forma alternada, onde ela se fixa no nó através da bainha.

A lamina da folha pode ter de 60 a 150 cm e uma largura de 2,5 a 10 cm. A folha faz o processo de transpiração vegetal, respiração e fotossíntese, sendo a coletora de energia do meio externo (GODOY, 2007).

A morte e substituição das folhas ocorrem durante todo o ciclo da planta, mas o número médio permanece praticamente constante em torno de 9 a 10 folhas vivas por colmo (Van DILLEWIJN, 1952).

Segundo Glasziou et al. (1965), a taxa de fotossíntese bruta das folhas de 1-7 e 8-10, foi de 1,5 vezes maior que o conjunto de folhas mais jovens. À medida que o colmo envelhece a taxa de assimilação decresce na proporção de 60% entre os 2 e os 18 meses de idade da planta, com redução constante até os 15 meses, estabilizando-se após esta idade.

Quando o canavial é colhido após a rebrota, a taxa fotossintética se torna alta novamente. Altas taxas são atingidas, tanto na cana planta como na cana soca.

Durante o período de fechamento do dossel, ocorre um período de produção intensa de colmos, com pico entre 3º e 5º meses após o plantio, mas em seguida 50% destes morrem e a população se estabiliza perto dos 9 meses de idade. A morte destes colmos também é considerada como uma perda de matéria seca (BULL, 1965).

Considera-se, também, que ao serem descartados durante o processo de competição, não constituem mais a matéria viva e, portanto, não consomem mais energia pelo processo respiratório (BARBIERI, 1993).

3.3 Fenologia

A fenologia estuda os fenômenos periódicos dos seres vivos e suas relações com as condições ambientais, regulando o desenvolvimento das espécies ao longo de seu ciclo. Segundo Bray (1980), durante o ciclo vegetativo existem fases em que a planta apresenta alterações em função da ação do ambiente. As principais fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar estão representadas na Figura 1, ilustrando os principais processos fisiológicos envolvidos em cada fase e sua duração aproximada.

Eventos	Germinação e Emergência	Perfilhamento e Estabelecimento	Elongação do colmo; Crescimento Intenso; Início do Acúmulo de Sacarose	Intenso acúmulo de sacarose
Fase	1) Emergência	2) Estabelecimento	3) Desenvolvimento da Cultura	4) Maturação
Duração	30 a 60 dias	60 a 90 dias	180 a 210 dias	60 a 90 dias

Figura 1 - Representação esquemática da fenologia da cana-de-açúcar
Adaptado de Kuyper, 1952 apud Doorembos e Kassan (1979)

3.3.1 Emergência

De acordo com a Figura 1, a Fase que vai da plantação à emergência das folhas, começa entre 7 e 10 dias após o plantio e, normalmente, dura entre 30 a 50 dias, sendo uma fase dependente da umidade, aeração e temperatura do solo e da sanidade e das reservas energéticas dos toletes utilizados no processo de propagação vegetativa (PARANHOS, 1987).

A brotação é um processo que consome energia e a origem desta energia vem das reservas contidas nos toletes. Cerca de 20 a 30 dias após o plantio observa-se a emergência de brotos em campo, denominados brotos primários e contendo uma sucessão de nós e entrenós muito próximos entre si.

Após o plantio, devem ocorrer condições ambientais favoráveis, sendo a temperatura ideal para florescimento entre 28 e 30°C. A temperatura base para a brotação é ao redor de 12°C. Solo úmido e calor asseguram uma brotação rápida, com aumento da respiração radicular, sendo indispensável uma boa aeração do solo. Logo em seguida inicia-se a atividade meristemática nos primórdios radiculares, e nos poros das gemas, estabelecendo o desenvolvimento das raízes do tolete e a emergência de um pequeno broto na superfície do solo (PARANHOS, 1987).

A brotação é um processo que consome energia e a origem desta energia vem da degradação de substância de reserva dos toletes. Após 20 a 30 dias de plantio, observa-se a emergência de brotos em campo, o broto recém emergido, agora denominado broto primário, contém uma sucessão de nós e entrenós muito próximos entre si e continuará seu crescimento em altura assumido pela gema apical.

A água tem um importante papel na rebrota, mesmo assim, a escassez de água não implica em grandes perdas nesta fase, sendo na fase seqüente, a falta de água pode comprometer gravemente o rendimento final da cultura.

As soqueiras da cana-de-açúcar têm um desenvolvimento semelhante ao observado na cana plantada, com diferenças específicas no processo de enraizamento e brotação da soca e principalmente com queda de produtividade em relação à cana-planta devido à compactação do solo, queda de fertilidade do solo sob uso continuo de cana e a utilização ineficiente de fertilizantes (MARIN et al., 2009).

3.3.2 Fase de estabelecimento

O perfilhamento começa depois de 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias (Figura 1), sendo um processo fisiológico de ramificação subterrânea contínuo das juntas nodais. Temperatura em torno de 30° C é considerada ideal, sendo a mínima de 20°C para que não haja retardo do perfilhamento. Segundo Suguitani (2006), temperaturas abaixo de 5ºC e acima de 45ºC têm efeito bastante prejudicial. A umidade ótima do solo varia de 15 a 25%. A partir da brotação das gemas inicia-se o processo de perfilhamento.

O perfilhamento é o processo de emissão de colmos ou hastes por uma mesma planta sendo estes denominados perfilhos, ocorrendo a partir da porção subterrânea

dos próprios colmos que existiam antes e tem uma variação de espécies para espécies, sendo que algumas têm maior atividade de perfilhamento, como *S. spontaneum*, enquanto outras têm menor capacidade de perfilhar, como *S. officinarum*, por exemplo.

O processo de perfilhamento é regulado principalmente por uma auxina que é formada no topo da planta e desce em fluxo continuo em direção a base. Esse hormônio é responsável pela biossíntese de enzimas específicas que atuam na degradação de polissacarídeos específicos da parede celular e do colmo, produzindo oligossacarídeos capazes de inibir o desenvolvimento das gemas laterais, que se mantêm dormentes. Ela também tem o papel de promover o crescimento do colmo e o impedimento do desenvolvimento das gemas laterais, no processo conhecido como dominância apical.

Em relação à regulação térmica do perfilhamento, foi observado que o pico de perfilhamento para cana soca inicia-se após 500 graus-dias (GD), e que a estabilização ocorre após 1200 GD, sendo considerada a temperatura base 16ºC. Tanto para a cana planta como para a cana-soca, o número de perfilhos começa a decrescer quando a cultura intercepta 70% da radiação fotossinteticamente ativa (INMAN-BAMBER, 1994).

3.3.3 Fase de desenvolvimento da cultura

Esta fase é caracterizada pelo acumulo nos internódios basais dos colmos mais velhos, com concentrações progressivamente menores à medida que vai se aproximando do ápice. Segundo Machado (1987), a síntese de sacarose é realizada nas folhas e transportada até o colmo onde é armazenada nos vacúolos do parênquima.

Durante a fase do desenvolvimento vegetativo, os processos fisiológicos da cana-de-açúcar não estimulam o acúmulo de sacarose, ao invés disso, a planta continua a desenvolver-se utilizando os fotoassimilados disponíveis. De forma geral, conclui-se que em condições favoráveis ao rápido crescimento, o acumulo de sacarose é muito pequeno, mesmo nos internódios maduros, mas em condições que restringem o crescimento, acaba por estimular o acumulo de sacarose, dando inicio a maturação da planta (MARIN et al., 2009).

De acordo com os mecanismos descritos acima, o uso de fertilizantes para elevar a produtividade podendo retardar a maturação favorecendo o crescimento vegetativo, sendo o excesso de nitrogênio a causa mais comum deste tipo de processo (SEGATO, 2006).

3.3.4 Maturação

A fase de maturação normalmente se inicia a partir de 270 dias após o plantio (Figura 1), com cerca de três meses de duração, sendo que o clima seco e a irradiância solar intensa não favorece o crescimento da cultura nesta fase.

No final do perfilhamento, os colmos mais desenvolvidos continuam crescendo em altura e aumentando sua espessura. Sem o dreno fisiológico dos colmos mais jovens, inicia-se o processo de acúmulo de sacarose nos entrenós basais dos colmos mais velhos, como resultado da produção excedente de fotoassimilados. À medida que vão amadurecendo os colmos que sobreviveram à competição da fase de perfilhamento, estes continuam crescendo e acumulando cada vez mais sacarose nos entrenós que ao atingir seu tamanho final, acabam se tornando colmos industrializáveis, passando a acumular de forma mais intensa a sacarose que provém da fotossíntese (SEGATO, 2006).

O acúmulo máximo de sacarose só ocorre quando a planta encontra condições restritivas ao seu crescimento, sendo o processo de acúmulo total de açúcares, comumente descrito como amadurecimento. A cana-de-açúcar poderá estar com alto teor de açúcar com apenas alguns meses de idade, bastando para isso ausência de água, nutrientes e outros fatores necessários ao seu desenvolvimento, não significando este fato que ela estará fisiologicamente madura, isto é, em ponto de colheita. Desta forma, apenas idade adulta não significa maturação total (RODRIGUES, 1995).

A época do plantio e da colheita tem que se ajustar ao ciclo normal climático da área plantada, uma das formas de se ajustar e sincronizar consiste em aplicar agentes amadurecedores, reguladores vegetais e várias práticas culturais, como corte do topo 42 (desponte), regulagem de água, programa de fertilização, visando antecipar a maturação ou melhorara situação normal.

Muitas vezes, o excesso de fertilizantes, visando a aumentar a produção, pode retardar a maturação, favorecendo o excesso de crescimento vegetativo, sendo o excesso de nitrogênio uma das principais causas associadas ao baixo conteúdo de sacarose em lavouras excessivamente adubadas (SEGATO, 2006).

O clima é outro fator que afeta a maturação e, como regra geral, cada cultivar ao alcançar a maturação máxima deve ser colhido, caso contrário seu teor de sacarose declinará, por isso existe um ajuste de época de plantio e colheita ao ciclo climático normal da região geográfica, sabendo-se que a precipitação intensa pode dificultar a colheita. Dentro deste ciclo, considera-se que a diminuição da temperatura tem importância fundamental no processo de maturação, sendo responsável pela redução do ritmo vegetativo para o acúmulo de sacarose nos colmos. Quando não ocorre a redução da temperatura, necessariamente deve ocorrer uma seca moderada para ocasionar a redução da elongação do internódio, resultando no aumento do teor de sacarose nos colmos (SCARPARI, 2007).

3.4 Sistema de produção

3.4.1 A cana planta e a soqueira

Conceitua-se cana-planta em formação, como aquela cana cuja origem está em mudas plantadas e que, posteriormente, sofrerão o primeiro corte. Após o primeiro corte, a cana brota, nos ciclos sucessivos de corte/brotação, é denominada de cana soca. O primeiro corte para as canas plantadas de janeiro a março ocorre aproximadamente após 18 meses, ou seja, no inverno do ano seguinte. A chamada cana de ano é aquela cujo plantio dá-se de setembro a outubro e a colheita ocorre aproximadamente 12 meses após o plantio, as diferenças entre elas estão basicamente no plantio e nos tratos culturais, com pequenas diferenças em teores de fibra e sacarose.

O modo de se produzir a soqueira, é após o corte (mecânico ou manual) da cana-planta, permanecem no solo as socas ou soqueiras da cana-de-açúcar. Os colmos industrializáveis devem ser cortados o mais próximo possível da superfície do

solo, restando as suas bases, as quais permanecem também ligadas ao sistema radicular formado pela cana-planta. Através do corte da parte aérea da cana, há perda de boa parte do sistema radicular da antiga planta, entretanto aproximadamente 90 dias após o corte, este sistema radicular é responsável pela absorção de água e nutrientes que são translocados para a gema da base da soqueira (SEGATO, 2006).

O corte da cana-de-açúcar possibilita a renovação da cultura, não só da parte aérea, mas também do seu sistema radicular. Contudo, este último na soqueira apresenta-se mais superficial do que na cana-planta e cerca de 60% de suas raízes se encontram na profundidade de 30 cm. Em torno de 20 a 30 dias do corte observa-se intensa brotação das soqueiras (SEGATO, 2006).

3.4.2 Cana de ano e cana de ano e meio

O plantio da cana-de-açúcar pode ser realizado de duas maneiras, a saber, conhecidos como sistema de cana-de-ano e sistema de cana-de-ano-e-meio. Nas condições climáticas do Centro-Sul do Brasil, a cana-de-ano é normalmente plantada entre setembro e novembro, com colheita após 12 meses de uma forma geral, onde destes, a cana vegeta 8 meses ativamente para iniciar o processo de maturação nos 4 meses finais do ciclo. Neste sistema, o canavial apresenta máxima taxa de crescimento entre novembro e abril em virtude do longo fotoperíodo, alta temperatura e disponibilidade hídrica.

De forma geral, a cana-de-ano-e-meio é plantada entre janeiro e abril de um ano, sendo colhida entre maio e novembro no ano seguinte, dependendo da época de maturação da variedade utilizada, permanecendo em média 18 meses no campo, daí sua designação ano-e-meio. Neste sistema, após seu estabelecimento, o canavial passa por uma espécie de período de repouso durante seu primeiro inverno, sendo cortada no inverno do ano seguinte (MARIN et al., 2009).

Assim, como na cana-de-ano, o período de maior crescimento da cana-de-ano-e-meio também vai de novembro a abril, mas o canavial atinge este período já mais desenvolvido, sendo capaz de responder mais rapidamente às condições ambientais favoráveis à cultura. Em ambos os sistemas de produção, para que o canavial possa aproveitar ao máximo as condições favoráveis quanto ao fotoperíodo, temperatura e

chuva do verão, é importante o sistema radicular já esteja desenvolvido e que as plantas contem com pelo menos 12 folhas (SEGATO et al., 2006).

3.5 Condicionamento agrometoerológico da produtividade

3.5.1 Temperatura do ar

A temperatura é um dos fatores mais importantes na produção da cana-de-açúcar. A temperatura basal para a cana-de-açúcar é em torno de 20ºC, a temperatura ótima gira em torno de 22 a 30ºC, sendo que nestas condições a cultura apresenta seu máximo desenvolvimento, acima de 38ºC não há crescimento (BARBIERI; VILLA NOVA, 1977; DOOREMBOS; KASSAN, 1979; MAGALHÃES, 1987).

A temperatura do ar tem relação direta com a brotação das gemas da cana-planta, desta maneira a faixa ideal de temperatura para a brotação é entre 34 e 37ºC sendo os extremos 21 e 44ºC limitantes para a brotação das gemas (NICKELL, 1975). A temperatura crítica do solo para a brotação é de 19ºC, sendo que a temperaturas menores que 10ºC são muito prejudiciais à brotação e a temperatura de 10ºC é danosa para o crescimento das raízes e brotos (ARGETON, 2006 apud CAMARGO, 1976).

O perfilhamento, assim como a brotação das gemas, é fortemente influenciado pelas variações da temperatura. A capacidade de perfilhamento da cana-de-açúcar é uma capacidade genética e inerente às variedades, de forma que existem materiais genéticos com baixa capacidade de perfilhamento, quanto que outros a apresentam com elevada capacidade, no entanto a temperatura e a radiação solar são os elementos climáticos mais importante na formação e no crescimento dos perfilhos, sendo que os valores de 30 e 20ºC são tidos como limites superiores e inferiores de tolerância das espécies, assim como em 35ºC o crescimento da cana-de-açúcar é lento e quanto maior ou igual a 38ºC é inexistente (ARGETON, 2006 apud CAMARGO, 1976; SANTOS, 1977; FAUCONNIER; BASSEREAL, 1975).

Segundo Singh e Lal (1935), a temperatura de 30ºC é ideal para a cana-de-açúcar bem como que a interação entre temperatura média e fotoperíodo na produção

de matéria seca e concentrarão máxima de sacarose no colmo, deve-se em temperatura de 30ºC (ARGETON, 2006).

A maturação da cana-de-açúcar é uma característica intrínseca da planta, podendo ser estimulada por fatores ambientais e de manejo, dentre os fatores ambientais o decréscimo de temperatura são favoráveis a maturação e desfavoráveis ao crescimento vegetativo dos colmos. Em regiões onde não há estação seca por ocasião da maturação da cana-de-açúcar é necessário que a temperatura média diária seja inferior a 21ºC, para promover o repouso fisiológico adequado e maior acúmulo de sacarose (ARGETON, 2006 apud CÂMARA, 1987).

O melhor índice bioclimático para correlacionar o desenvolvimento dos vegetais e a temperatura é dos graus-dias ou tempo térmico (TT), que pode ser calculado pela área entre a temperatura base, abaixo da qual o desenvolvimento é considerado nulo segundo Barbieri et al. (1978).

O desenvolvimento de uma cultura depende das taxas de perfilhamento, aparecimento de folhas, extensão da folha e do seu tipo. O tempo térmico (TT), cuja unidade é ºC d^{-1} (graus Celsius por dia) utilizado para predizer o aparecimento de folhas em todas as culturas, sendo aplicado à cultura de cana-de-açúcar de diversas formas. Van Dillewijn (1952), utilizou este método nas Ilhas Maurício, contabilizando cada unidade de TT para cada grau acima de 15ºC, e meia unidade quando a temperatura passou de 21ºC. Bacchi e Souza (1977), obtiveram uma temperatura base (Tb) de 19ºC para mensurar a altura do colmo.

O crescimento do colmo é atrasado 100 dias quando a cana-de-açúcar é submetida à 18ºC em vez de uma temperatura constante de 30ºC (GLASZIOU et al., 1965). Barnes (1974) descobriu uma temperatura base para a germinação esta em torno de 12 ºC. Ferraris et al. (1994), usou como temperatura base 15 ºC para determinar os requerimentos do tempo térmico para a emergência das folhas em cana-de-açúcar. Este requerimento é aumentado com o aumento com a pressão de vapor, déficit de pressão e estresse hídrico (INMAN-BAMBER, 1993)

Segundo Inman-Bamber(1993), o tempo térmico é derivado da acumulação da diferença entre a temperatura média (T) e a temperatura base (Tb) para cada dia a partir da data de plantio, em experimentos, para uma temperatura base de 16ºC, o pico

de densidade de colmo foi em torno de 500 ºC d^{-1}, e se estabilizou em torno de 1200 ºC d^{-1} nos dois cultivares experimentais (NCo376 e N12). Ferraris et al. (1994), em experimentos na Austrália encontrou para uma temperatura base de 15 ºC o pico de densidade do colmo a partir de 730ºC d^{-1}, e a estabilização em torno de 1700ºC d^{-1}.

A cana-de-açúcar, para aumentar seu teor de sacarose, necessita de uma época mais fria e mais seca. Onde não há deficiência hídrica a temperatura ótima média tem que ser inferior a 21 ºC pelo período de três meses para que ocorra um repouso vegetativo e inicie-se o processo de maturação. Os trabalhos em gerais não relatam a influência da queda de temperatura, mas apenas que a amplitude térmica poderá atuar como fator favorável a maturação (SCARPARI, 2002).

Inman-Bamber (1991b) utilizou 12ºC como temperatura basal para o aparecimento de folhas. Para a variedade NCo376, neste mesmo trabalho, o autor encontrou 70ºC d^{-1} por folha para o aparecimento das primeiras 11 folhas e 130 ºC d^{-1} por folha para as subseqüentes.

Com relação à senescência foliar, em experimentos com as variedades NCo376 e N12 na África do Sul, verificou-se que a senescência das folhas foi acelerada durante dois períodos de estresse hídrico, em janeiro e agosto (1990). Soqueiras iniciadas em abril e junho (1990), produziram menos do que 8 folhas por colmo e desta maneira não foi afetada pelo estresse hídrico (INMAN-BAMBER, 1993).

Ainda neste trabalho, o autor concluiu que a temperatura é o maior fator que influência o perfilhamento e o aparecimento de folhas, e este fator é mais importante do que a eficiência da interceptação luminosa para a cultura de cana-de-açúcar, quando a temperatura esta mais alta do que a radiação baixa. A temperatura-base para o aparecimento de folhas e de perfilhos foram de 12ºC e 16ºC respectivamente. A ocorrência da maior densidade de colmos ocorre aproximadamente com 500 ºC d^{-1} após o plantio. A senescência dos perfilhos iniciou-se após a interceptação de 70% da interceptação da radiação PAR, associando-se largamente com o tempo térmico. A quantidade de água no solo não é um importante fator quando menos de 10 folhas apareceram (INMAN-BAMBER, 1993).

A taxa de respiração da cana varia com a temperatura e os resultados obtidos por Glover (1973) mostram que a taxa de respiração de plantas inteiras (Rp), dos

colmos (Rc) e das folhas (Rf) mostraram relação com a temperatura noturna (Tn) (Equações 1 a 3), permitindo observar que a taxa de respiração das folhas é maior que a dos colmos.

$$RF = 0{,}387Tn - 4{,}02 \quad (MgCO_2\ min^{-1}\ Kg^{-1}) \quad (1)$$

$$RC = 0{,}385Tn - 4{,}7 \quad (MgCO_2\ min^{-1}\ Kg^{-1}) \quad (2)$$

$$RF = 0{,}402Tn - 1{,}34 \quad (MgCO_2\ min^{-1}\ Kg^{-1}) \quad (3)$$

3.5.2 Radiação solar

A cana-de-açúcar é uma planta cujo ciclo fotossintético é o C4, por isso apresenta alta eficiência em captação e armazenamento de energia radiante e na sua conversão em energia química. A fotossíntese máxima ocorre com o comprimento de onda da luz azul (na faixa de 0,48 nm). Os efeitos da intensidade luminosa foram observados por Waldron et al. (1967) em condições de folha individuais, sem sombreamento, detectou ocorrência de saturação luminosa em torno de 420 W/m^2, com índice de área foliar (IAF) igual a 4, não foi detectada a saturação (BARBIERI, 1993).

Inman-Bamber (1993), na África do Sul, verificou que o tempo para a primeira soqueira alcançar 70% de interceptação da radiação PAR é afetado significativamente pela data de plantio. Canaviais plantados no inverno, por exemplo, levaram de duas a três vezes mais tempo para alcançar a interceptação de 70% da PAR do que as áreas iniciadas no verão. Verificou-se, também, que a segunda soqueira conseguiu atingir este patamar de interceptação mais cedo do que a primeira soqueira iniciadas no mesmo ano e na mesma data.

À medida que o ambiente oferece altas temperaturas do ar, radiação solar intensa e água disponível no solo, a biomassa aumenta como fruto da conversão de radiação solar em matéria orgânica. Outra característica que oferece boa eficiência de captação de energia solar é a distribuição do ângulo de inserção das folhas, esta

relação pode ser representada na forma do coeficiente de extinção da radiação solar. Este por sua vez é função da arquitetura do dossel e do ângulo zenital do sol (MARIN et al., 2009).

Muchow et al. (1994) encontrou valor médio do coeficiente de extinção do dossel da cana-de-açúcar em cerca de 0,38 em cultivo na Austrália, o que corresponde a um ângulo médio de inserção de folhas variando entre 67º e 68º (MARIN et al., 2009) condição próxima àquela observada para as cultivares de milho melhoradas (CAMPBELL; NORMAN, 1998). Esta característica, por sua vez, tende a elevar a extinção de radiação sob ângulos zenitais maiores, minimizando a absorção de radiação nos momentos mais quentes do dia, quando outros fatores tendem a ser mais restritivos que a radiação.

Além disso, folhas mais eretas como as observadas nos canaviais permitem o adensamento das plantas, maximizando o rendimento por área e explicando, em parte, os níveis de produtividade observados em condições de campo. Galvani et al. (1997) experimentando esta hipótese observaram aumento da produtividade nos espaçamentos menores, com elevação no índice de área foliar e, conseqüentemente, acréscimo na taxa fotossíntese do dossel vegetativo. Os autores concluem também que redução de espaçamento de 1,80m para 0,90m elevou em 9% a produtividade agrícola, o que equivaleu a cerca de 9 t de colmos por hectare (MARIN et al., 2009).

A radiação solar afeta de forma diferente cada fase da cultura, sendo assim constatou-se que: a) durante a germinação não há evidência de que a radiação solar tenha efeito sobre o desenvolvimento das gemas, de modo que a cana pode germinar mesmo na ausência de radiação (FAUCONIER; BASSERAU, 1970), enquanto que na fase de desenvolvimento vegetativo há diversos eventos dependentes da radiação; b) o perfilhamento é favorecido pela radiação solar intensa, de modo que sob alta intensidade luminosa e durante os períodos em que o IAF é relativamente baixo. Com o desenvolvimento foliar, a extinção de radiação na folhagem torna-se mais intensa e a competição por luz se acentua, exigindo um re-equilíbrio entre a quantidade de energia radiante recebida e o número de perfilhos que poderão sobreviver. Assim, na fase em que o dossel da cana-de-açúcar começa a cobrir totalmente o solo, perde-se grande parte dos perfilhos jovens justamente por limitação de radiação solar.

Segundo Fauconier e Basserau (1975), canaviais cultivados em regiões com radiação solar intensa têm maior área foliar, folhas mais espessas e verdes, raízes mais desenvolvidas, tendem a acumular mais matéria seca (açúcar e fibras) em detrimento da quantidade de água.

Em regiões tropicais e subtropicais, em particular, a cana-de-açúcar mostra crescimento muito vigoroso no início do verão durante os dias mais longos e, especialmente após as chuvas de verão que ocorrem no meio do dia, quando o céu se abre e a radiação solar é intensa. Nestas ocasiões, associam-se todas as condições requeridas para altas taxas de crescimento: elevada disponibilidade de água no solo, temperatura elevada e radiação solar intensa (MARIN et al., 2009).

3.5.3 Chuva, evapotranspiração e umidade do solo

Segundo Hubert (1968), a umidade do solo pode atuar na maturação da cana-de-açúcar, de modo que para ocorrer o processo de maturação fisiológica e acúmulo de açúcar em locais onde não há redução sazonal da temperatura do ar, a cultura deve ser submetida a uma seca moderada. Este fator, em conjunto com as baixas temperaturas e a deficiência nutricional, restringe a elongação do internódio, resultando no aumento do conteúdo de sacarose pela reduzida demanda de fotoassimilados nas regiões meristemáticas, sendo assim, o conteúdo da sacarose depende da radiação solar, da temperatura, do teor de água e da biomassa (ARGETON, 2006).

Os déficits hídricos provocam a redução da área foliar e no acúmulo de biomassa com ligeiro impacto na produção final (WIEDENFELD, 2000). O déficit hídrico severo ocasiona um impacto maior na produtividade dos colmos e de sacarose. Inman-Bamber (2004) concluiu que o acúmulo de biomassa é grandemente reduzido com déficit hídrico superior a 120 mm anuais e o acúmulo de sacarose no colmo é afetado com déficit hídrico superior a 145 mm anuais (ARGETON, 2006). A deficiência hídrica diminui a velocidade e o fluxo de translocação tanto para a região apical como para as raízes diminui à medida que a restrição hídrica se acentua (PARANHOS apud MACHADO, 1987).

O consumo de água pela cana-de-açúcar varia de acordo com o estágio de desenvolvimento e depende da variedade. A perda de água pela cultura durante seu

ciclo vegetativo é função de sua área foliar, estágio fenológico e densidade do sistema radicular.

Para estimativa das necessidades hídricas da cultura, ou a evapotranspiração máxima da cultura (ETc), o método mais aceito é que se vale da evapotranspiração de referência (ETo) (ALLEN et al., 1998) corrigido em função do coeficiente de cultura (Kc) especifico para cada fase fenológica de uma dada espécie, seguindo a relação:

$$ETc = KcETo \tag{4}$$

em que Kc é o coeficiente da cultura, ET_0 é a evapotranspiração de referencia e ETc é a evapotranspiração máxima da cultura.

Os valores do Kc para a cana-de-açúcar variam de 0,4 a 1,25 para o inicio (dossel cobrindo pouco a área), meados e de (dossel cobrindo plenamente a área) períodos de desenvolvimento da colheita chegando a 0,7 para o máximo desenvolvimento (ALLEN et al., 1998). Inman-Bamber e Mcglinchey (2003) determinaram o Kc para a cultura de cana-de-açúcar utilizando a relação de Bowen sendo este um método de balanço de energia experimentado na Austrália e Swaizland. Estes autores validaram os valores do Kc de Allen et al. (1998) para os períodos iniciais e para os meados do desenvolvimento, mas o Kc = 1,25 é mais elevado do que os valores encontrados por Allen et al. (1998) durante os Estados finais de desenvolvimento da colheita, desde que a água não estivesse limitando o desenvolvimento.

Sendo o fator hídrico um dos que mais atuam na produtividade da cultura, faz-se necessário incluir esta variável nos modelos de estimativa da produtividade, associando assim os elementos chuva e evapotranspiração sobre a produtividade, para fases fenológicas da cultura (DELGADO ROJAS, 1998).

Quando a quantidade de água não atende à necessidade hídrica da cultura, desenvolve-se um estresse hídrico que afeta negativamente o crescimento e, por fim, o rendimento final da cultura, já que causa o fechamento dos estômatos e a diminuição da fotossíntese em adaptação a escassez de água (PEREIRA et al., 2002). Por isso, o

efeito do estresse hídrico sobre a planta depende da espécie e da variedade da cultura, mas também depende do período em que ocorre, da sua duração e intensidade.

Os efeitos do estresse hídrico variam em função da fase de desenvolvimento e do grau de sensibilidade da cultura. Uma das formas de se quantificar quanto o suprimento de água não atende as necessidades hídricas da cultura, é através da relação entre a evapotranspiração máxima (ETm) e da evapotranspiração real (ETr), pois o estresse hídrico se inicia exatamente quando a evapotranspiração real é inferior a evapotranspiração máxima (ETr>ETm), quando as condições assumem esta forma, a planta já não esta mais nas condições de produzir matéria seca como antes, pois a fotossíntese como já foi dito começou a ser afetada de forma adversa.

O estresse hídrico é uma ocorrência comum em todos os tipos de culturas em locais de produção, incluindo a produção da cana-de-açúcar. Uma boa compreensão de como a cultura responde ao estresse hídrico é a condição prévia para escolher o melhores cultivar e práticas de gestão para se explorar ao máximo os recursos naturais. Por isso no planejamento do plantio e colheita é largamente necessário adequar os períodos de estresse hídrico de forma que o mesmo seja mínimo durante fases críticas do crescimento da cultura (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Para se compreender melhor os efeitos do estresse hídrico, faz-se necessário uma investigação no mecanismo fisiológico da planta que são à base da resposta a esta condição. O potencial de água da folha, pode ser visto como uma medida de sensibilidade da planta a alterar as condições da água (TAIZ; ZEIGER, 2002). Entretanto, Salindra e Meinzer (1989), observaram que a condutância estomatal declina em resposta ao solo com baixos níveis de água, causando significativa mudança no potencial de água da folha.

Inman-Bamber e Smith et al. (1999) demonstraram como a variabilidade genotípica influi na determinação dos efeitos do estresse hídrico sobre a produtividade da cultura. O fechamento estomatal, a queda precoce das folhas e o ajustamento osmótico são mecanismos possíveis para a tolerância da seca, pois a cana-de-açúcar pode suportar certo grau de estresse hídrico sem afetar a acumulação da biomassa e da sacarose.

A resposta da cana-de-açúcar a irrigação ou a falta de irrigação sobre estresse hídrico pode ser dividida em três fases: a) estabelecimento, b) desenvolvimento vegetativo e c) maturação (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Na fase de estabelecimento, a perda de água com a evaporação da superfície do solo é o principal componente da evapotranspiração durante esta fase, por isso, 39% da ETc provém deste processo quando o IAF esta entre 0,7 e 2,5 quando o solo não esta adubado. A adubação e as coberturas plásticas artificiais reduzem a evaporação do solo em 50%.

Em Buderkin, na Austrália, Robertson et al. (1999a) mostrou que após uma irrigação inicial após a plantação, a irrigação foi suspensa por um período de quase 5 meses (durante o inverno) reduzindo o IAF substancialmente (1,8 a 0,9), mas rendimento do colmo e da sacarose na colheita foram afetados de modo mais suave.

Durante a fase de desenvolvimento vegetativo o estresse hídrico pode comprometer e prejudicar o desenvolvimento do colmo e da sacarose de forma considerável (ROBERTSON et al., 1999a). Estes autores observaram que as perdas de rendimento nesta fase, devido ao estresse hídrico, têm como um dos fatores a redução da eficiência de absorção da radiação e o comprometimento na partição da matéria seca para o colmo, além de reduzir também a quantidade de radiação interceptada devido ao baixo IAF causado pela falta de água.

De acordo com Inman-Bamber et al. (1999a), a irrigação pode ser recomendada quando a taxa de crescimento do colmo cai 50% do seu potencial nesta fase e, neste caso, a irrigação garante que não haverá alteração no rendimento da biomassa e da sacarose. Entretanto, sabe-se que a cana-de-açúcar pode tolerar mais estresse hídrico do que esta recomendação, pois Inman-Bamber (2004) encontrou que a biomassa não teve redução, mesmo quando a taxa de crescimento do colmo caiu até 30% do seu potencial.

Na fase de Maturação, experimentos mostram que em períodos secos prolongados conduzem a perda do rendimento do colmo, mas aumenta as taxas de acúmulo de sacarose podendo haver compensação entre elas (INMAN-BAMBER; JAGER, 1988a; INMAN-BAMBER, 2004; ROBERTSON et al., 199b). De acordo com esses trabalhos, baseados em 37 experimentos de secas prolongadas nesta fase da

cultura na África do Sul entre 1966 a 1995, destes experimentos concluiu-se que as taxas de sacarose aumentaram em função da falta de água entre 0,5 e 2,5 t ha^{-1}.

O modelo APSIM-Sugarcane, por exemplo, foi utilizado no trabalho de Keating et al. (1999a) para simular melhores períodos não irrigados e de estiagem prolongada para esta fase em vários tipos de solo, clima e diferentes datas de colheitas, onde baseou-se em perdas de rendimentos entre 4 a 8%. Este trabalho tornou-se diretriz para irrigação e época de plantio e colheita em Buderkin, na Austrália (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). O grande benefício de um período seco para esta fase é o ganho de 3,6 t ha-1 sacarose, o que deva encorajar a melhor compreensão futura do processo de senescência e os períodos secos ou sem irrigação, bem como o processo de partição da matéria seca nesta fase (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

3.6 Modelagem aplicada à cana-de-açúcar

3.6.1 Teoria geral dos modelos

Modelos são representações idealizadas para situações do mundo real e representam um meio de transformar conhecimento em informação útil e transferi-lo para terceiros (CAIXETA FILHO, 2001).

Os modelos iniciaram-se nos anos 50, pois sua viabilidade tornou-se possível com o avanço das máquinas de processar e armazenar cálculos, que possibilitaram definir e determinar interações entre diferentes variáveis. Nos meados dos anos 60, emergiu o conceito de sistemas dinâmicos, facilitando as representações dos processos de fluxos e suas interações. Durante os anos 70, os sistemas dinâmicos foram formalizados, refinados e continuados através dos anos 80, primeiramente nas técnicas de programação computacional para verificação, validação e evolução dos modelos, tornando-se parte integral da ciência agrícola.

Desde então, os modelos vêm acrescentando entendimento sobre as interações nos ecossistemas, a influência e o desenvolvimento das práticas de manejo, expandiu grandemente o potencial dos sistemas de apoio a tomadas de decisões. Nos meados dos anos 90, experimentando a emergência da era da informação e da

tecnologia, os modelos ganharam importância vital no campo cientifico e prático, sendo as ferramentas fundamentais da ciência atual.

Há vários tipos e formas de modelos, utilizando-se de diferentes áreas do conhecimento e diversos tipos de ferramentas, no presente trabalho, o modelo é considerado como a representação matemática de um sistema, e a modelagem é o processo de desenvolvimento desta representação. Para a construção de um modelo é necessário elaborar a simulação computacional utilizando-se de variáveis de entrada e saída (*inputs e outputs)*, parâmetro e constantes, variáveis de Estado, modelos dos processos, verificação, calibração e validação (JONES; LUYTEN, 1998).

3.6.1.1 Simulação computacional

A simulação computacional inclui os processos necessários para a operacionalização do modelo para simular o comportamento do sistema real. Nesta etapa, desenvolve-se a lógica computacional, diagramas de fluxos, códigos computacionais. Na prática, a modelagem e a simulação computacional estão inter-relacionados, devendo ter-se em mente as técnicas para a implementação do modelo matemático bem como sua conceitualização e desenvolvimento.

3.6.1.2 Entradas e saídas

As entradas no sistema são fatores encontrados no meio ambiente, que influenciam largamente o comportamento do sistema, mas que são influenciados pelo sistema. As entradas sempre se referem às variáveis exógenas, que conduzem outras variáveis ou definem funções. As entradas podem variar com o tempo, e valores numéricos para a entrada são necessários para todos os valores de tempo para os quais o modelo é simulado pelos valores prescritos, tabelas, ou equações. Chuva, temperatura e radiação incidente são exemplos de entrada para um modelo que envolva a simulação do crescimento de culturas. A escolha das entradas e dos componentes para vários modelos pode diferir, dependendo do objetivo e da disponibilidade de dados do modelo.

As saídas do sistema representam o comportamento característico do mesmo, sendo de grande interesse do modelador. Como exemplos de saídas de um sistema de cultivo podem ser citadas: produtividade econômica, biomassa total, quantidade de água consumida etc.

3.6.1.3 Parâmetros e constantes

Parâmetros e constantes são características dos componentes dos modelos e são constantes através do tempo de simulação. Usualmente, constantes são quantidades confiáveis e valores acurados permanecendo os mesmo quando as condições experimentais são variadas ou quando o modelo é aplicado a diferentes genótipos ou organismos. Parâmetros são grandezas que podem apresentar variação, mas que num mesmo processo de simulação mantém valores constantes. Por exemplo, os parâmetros podem ser utilizados para diferenciar espécies de cana-de-açúcar quanto a sua resposta fotossintética em relação à luz, o seu filocrono ou o número máximo de perfilhos (JONES; LUYTEN, 1998).

3.6.1.4 Variáveis de Estado

As variáveis de Estado são quantidades que descrevem a condição dos componentes do sistema. Estas variáveis mudam com o tempo nos modelos dinâmicos, assim como as interações dos componentes dos sistemas ao longo do desenvolvimento. Por exemplo, quantidade de água no solo e biomassa são duas variáveis de Estado que se modificam com o tempo na maioria dos modelos de simulação de crescimento de plantas.

3.6.1.5 Processos dos modelos

A inter-relação entre os componentes de um sistema é essencial quando se pretende trabalhar com sistemas agrícolas e, neste sentido, o termo “modelos baseados em processos” tentam descrever fluxos e armazenamento das grandezas de interesse, como massa, energia e substâncias. Por exemplo, a variável de Estado biomassa da cultura muda como resultado dos processos de fotossíntese e de respiração, enquanto

que a quantidade de água no solo é alterada de acordo com os resultados da precipitação, percolação e pelos processos de evapotranspiração, sendo ambas integradas para descrever o Estado fisiológico da cultura e seu acumulo de biomassa, por exemplo (JONES; LUYTEN, 1998).

Modelos contínuos são caracterizados pelas variáveis de Estado que podem variar suavemente em um pequeno intervalo de tempo e não é restrita a valores inteiros. Por outro lado, os modelos discretos são aqueles que têm variáveis que descrevem o sistema assumem valores inteiros. Os modelos de culturas agrícolas são usualmente classificados como modelos contínuos, sendo, de forma geral, representados por um conjunto de diferentes equações derivadas da estrutura do sistema e da inter-relação entre seus componentes (JONES; LUYTEN, 1998).

3.6.1.6 Verificação

A verificação envolve a evolução da precisão de acordo com o código computacional que representa matematicamente o modelo. A fase de verificação envolve a checagem das manipulações matemáticas, unidades e suas conversões, lógica da programação e código para certificar-se que nenhum erro ocorra na utilização de mais de um programa podendo gerar incompatibilidade de linguagem e unidades métricas.

3.6.1.7 Calibração

A calibração consiste em fazer ajustes nos parâmetros do modelo para se obter o melhor ajuste entre os resultados obtidos pela simulação e os resultados obtidos em campo. Mais precisamente, a calibração envolve o ajuste de certos parâmetros pela sistemática comparação entre o que foi simulado e o que foi observado. A estrutura do modelo é a mesma, e os parâmetros são ajustados para se aproximar mais do comportamento real do sistema. Em muitos casos, a calibração é a única forma prática de estimar alguns parâmetros.

3.6.1.8 Validação

A validação é o processo de comparação entre os resultados simulados com os resultados mensurados em campo que não foi previamente utilizado na calibração ou na estimação dos parâmetros dos processos. O propósito da validação é determinar se o modelo possui uma precisão suficiente para representar o objeto em estudo. Variáveis de Estado simuladas são comparadas com as variáveis de Estado obtidas em campo.

Usualmente, nos estudos simulação de culturas agrícolas, há poucas variáveis de Estado e muitas possibilidades de serem medidas, sendo assim sua completa comparação por muitas vezes não é possível. A validação envolve decisões subjetivas. Primeiro as áreas de comparação devem ser selecionadas. A mensura da precisão deve ser estabelecida, assim como o rendimento final da cultura. A escolha do critério e as variáveis de Estado mais importantes para a comparação deve se basear no objetivo do modelo. Os esforços de validação são essenciais para a aplicação dos modelos de culturas (JONES; LUYTEN, 1998).

3.6.1.9 Conceitos e Definições em Modelagem

A modelagem dos sistemas contínuos é uma aproximação dos modelos baseados em processos para descrever o comportamento de um sistema. Os processos possuem três categorias: transporte ou fluxo, transformação e armazenamento. Tais processos podem ser descritos por dois tipos de variáveis: extensivas e as intensivas. As variáveis extensivas são caracterizadas pelas quantidades que percorrem o fluxo, como massa, volume, carga elétrica, energia total, força, dependem sempre da dimensão do sistema. As variáveis intensivas são aquelas que mensuram a intensidade de energia ou dos potenciais através dos sistemas e independentes das dimensões dos sistemas, como a temperatura, pressão, massa volumétrica. As variáveis extensivas e intensivas se apresentam de forma muito bem definidas para muitos sistemas químicos, físicos e biológicos, sendo amplamente utilizadas.

Nestes sistemas, o componente do processo é descrito pela relação entre as variáveis intensivas e extensivas. Por exemplo, o fluxo de calor dentro de um condutor é descrito pelas propriedades da condutância de calor e a diferença de temperatura é

uma variável intensiva. O fluxo de água no solo é descrito pelas propriedades do solo e pelo gradiente de pressão do solo. O fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera é, algumas vezes, representado por resistências e gradientes de potenciais de água. As variáveis extensivas são medidas para um ponto e as variáveis intensivas são medidas através do objeto de interesse (JONES; LUYTEN, 1998).

3.6.1.9.1 Modelagem dos compartimentos

A modelagem dos compartimentos é uma ferramenta muito útil na concepção do sistema, com sua ênfase primária no fluxo e armazenamento das variáveis do sistema. O modelo dos compartimentos é amplamente utilizado nos esquemas de representações em sistemas agrícolas, biológicos e ecológicos Essa aproximação é particularmente útil na conceituação dos sistemas contínuos.

O modelo matemático na forma de equações diferenciais de primeira ordem, que descrevem a estrutura do sistema, pode ser obtido diretamente dos diagramas do compartimento. No entanto, as diversas variações nos símbolos usados para representar os componentes nos modelos de compartimentos, a mais utilizada é a notação de Forrester (1961), que obteve representações pitorescas dos sistemas de equações nos modelos dinâmicos industriais (JONES; LUYTEN, 1998).

O compartimento é definido como sendo a quantidade ou nível das varáveis de Estado. Compartimentos representam as variáveis de Estado no sistema ou as suas transformações. Um modelo conceitual pode ser constituído de uma rede de compartimentos que representam todos os componentes relevantes do sistema. Os componentes são conectados por linhas que representam as taxas de fluxos de quantidades entre compartimentos. O nível representa a variável de Estado em um ponto no tempo, e é apresentada por um retângulo. Fontes e recursos representam o ambiente do sistema, no qual o fluxo pode ocorrer da fonte no ambiente para o sistema sem afetar o ambiente. O símbolo da taxa representa o fluxo de um componente para outro, de uma fonte para um compartimento. A variável auxiliar é representada por um circulo e representa fatores (entradas e parâmetros) que influenciam as taxas. Linhas sólidas representam o fluxo de materiais e as linhas pontilhadas, o fluxo de informação (Figura 2).

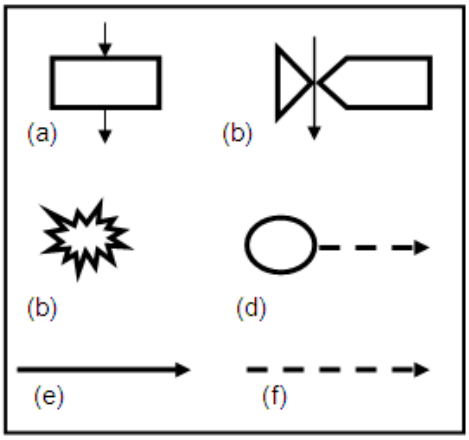

Figura 2 - Símbolos do modelo de compartimento adaptado de Forrester (1961). a) nível, b) taxa, c) fonte, d) variável auxiliar, e) caminho do fluxo de material, f) caminho do fluxo de informação

Após a construção do modelo de compartimentos, pode-se escrever a representação matemática do modelo, representando a utilização dos confinamentos estruturais e descrição dos componentes. Para os diagramas listados, os confinamentos estruturais, ou a continuidade pode ser aplicada para cada nível do compartimento:

$$\frac{dxi}{dt} = \sum_{j} Ii,j - \sum_{k} Oi,k \qquad (5)$$

em que: xi é O nível da iésima variável, $\frac{dxi}{dt}$ = taxa de variação do nível da inésima variável; Ii,j é a taxa de fluxo no nível i da fonte j; Oi,k é a taxa de fluxo fora do nível para a fonte k.

3.6.2 Modelagem no contexto agrícola e da cana-de-açúcar

Segundo Thornley (1976), a elaboração de um modelo matemático fisiológico implica em uma série de vantagens nos estudos agrícolas. Dentre eles pode-se citar os seguintes benefícios obtidos com seu uso: a) informações sobre diversos processos fisiológicos podem ser reunidas em um único modelo, para se ter a idéia da cultura

como um todo; b) um modelo resume convenientemente grande quantidade de informações; c) a base matemática para as hipóteses adotadas permite compreender quantitativamente a natureza das interações ambiente–planta; d) a modelagem estimula novas idéias; e) a elaboração de um modelo ajuda a detectar áreas onde o conhecimento é limitado; f) modelos permitem interpolações e previsões.

Para os produtores, os modelos podem ser utilizados processo de decisão do agricultor no planejamento da produção da cana-de-açúcar foi beneficiado pela disponibilidade de computadores, permitindo assim selecionar alternativas mais adequadas após análise de grande quantidade de dados.

Na área de estudo e pesquisa, os modelos são utilizados para estimar a importância e o efeito de certos parâmetros, produzindo assim um melhor entendimento dos sistemas agrícolas analisados, além de auxiliar no conhecimento das interações básicas no sistema solo-planta-atmosfera.

Os modelos de cultivos agrícolas, recentemente têm obtido grande importância no cenário da pesquisa em agricultura, com forte impulso nas últimas 4 décadas. Um dos primeiros escritos sobre modelagem foi de Das (1936) seguido por Borden (1948) e Stanford e Ayres (1964), relatando a nutrição de nitrogênio nas plantas. Na seqüência, têm-se os trabalhos de Glover (1972); Bull e Glasziou (1975); Thompson (1978); Muchow e Robertson (1994) que incorporaram a fotossíntese, interceptação luminosa e a partição de biomassa. Doorembos e Kassan (1979), que se basearam nos trabalhos de De WIT (1965), Jones (1980) e Robertson e Muchow (1994), incorporaram o uso da água, irrigação e déficit hídrico, sendo a contribuição destes autores o cerne dos atuais modelos da cana-de-açúcar (LISSON et al*.,* 2005).

No Brasil, a modelagem envolvendo a cultura da cana-de-açúcar tem sido alvo de uma série de estudos desde a década de 70, citando-se dentre esses o modelo SIMCANA proposto por Ometto (1974). Este modelo é um simulador matemático-fisiológico do crescimento da cultura, tendo como variáveis de entrada a radiação solar global, temperatura máxima e mínima e umidade relativa do ar, obtendo-se a partir delas as taxas de fotossíntese, respiração, crescimento da cultura, senescência das folhas e raízes, o valor acumulado de massa seca das folhas, colmo e raízes, alem do índice de área foliar (PEREIRA; MACHADO, 1985).

3.6.3 Os atuais modelos para a cana-de-açúcar

Atualmente, os modelos mais utilizados mundialmente em escala local em cana-de-açúcar são os australianos QCANE E APSIM e o sul-africano CANEGRO. Esses modelos têm em comum a busca do melhor avanço e entendimento dos seguintes processos: a) efeitos do estresse hídrico (água, nitrogênio e temperatura) sobre a partição dos fotoassimilados, b) resposta dos diferentes cultivares a este estresse e c) as diferenças entre a cana-planta e cana-soca quanto ao uso eficiente da radiação e a eficiência da respiração (O'LEARY, 2000).

O CANEGRO (Figura 3), desenvolvido por Penning De Vries, Brunsting e Van Laar (1974) que foi iniciado com o desenvolvimento das equações de fotossíntese e respiração surgidas na escola de Wagenigen, os cálculos do balanço hídrico foram melhorados pela inclusão da ETo (evapotranspiração de referência) segundo o método de Penman-Monteith (INMAN-BAMBER et al., 1993; MCGLINCHEY; INMAN-BAMBER, 1996).

A época de sua criação, o objetivo principal consistia na determinação da época ótima de colheita na indústria açucareira sul-africana. Atualmente, o modelo tem sido largamente utilizado em diversos países do mundo, especialmente após sua integração ao sistema DSSAT (JONES et al., 2003). Seu princípio consiste na simulação da partição da sacarose, além de simular o carbono, desenvolvimento da colheita, energia e componentes de simulação de água (O'LEARY, 2000 apud INMAN-BAMBER, 1994, 1995b, 1996b).

O modelo de CANEGRO foi testado extensivamente em seu desempenho de simular a biomassa e as relações do cultivar com a água do solo para um cultivar sul-africano (NCo376) (Figura 3). Esses testes estiveram sobre uma variação ampla de latitude (258ºS a 318ºS), em altitudes entre 15 a 1067 m e solos da região açucareira sul-africana (INMAN-BAMBER, 1994, 1995b, 1996a). No teste de desempenho comparativo de Keating et al. (1995) sem estresse hídrico déficit de nitrogênio, o modelo é mostrou geralmente ser robusto em seu desempenho (O'LEARY, 2000). A Figura 5 descreve o modelo conceitual do CANEGRO.

Dentre as varáveis de entrada utilizadas neste modelo, podem ser citadas a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (IPAR), já para as variáveis de saída

tem-se o incremento de biomassa, temperatura média diária, gradiente de amadurecimento, temperatura do coeficiente de resposta, coeficiente de sensibilidade do solo ao estresse hídrico, classificação do solo, dentre outros parâmetros de precisão para variedades e condições bastante específicas (SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002).

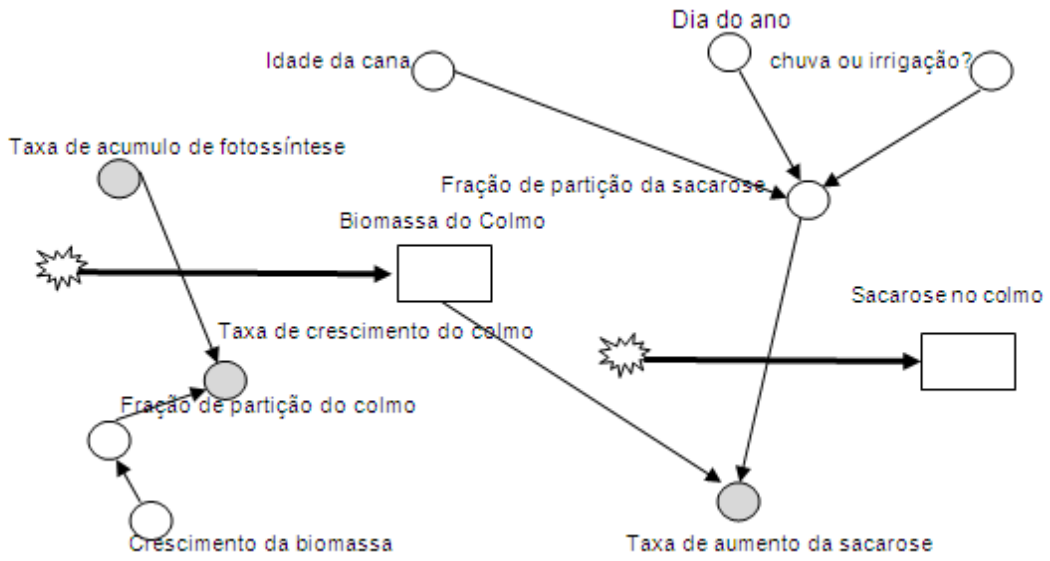

Figura 3 - Modelo conceitual para estimativa da acúmulo de sacarose do CANEGRO (adaptado de INMAN-BAMBER; KIKER, 1997)

Outro modelo de grande importância em escala mundial é o QCane (Figura 4), desenvolvido por Bull e Tovey (1974) é um tipo de modelo baseado em processos que evoluiu de forma mecanicista com ênfase na fotossíntese, respiração e partição dos fotoassimilados. Nele, todo fotoassimilado produzido diariamente é dividido em biomassa estrutural ou sacarose nas diferentes partes da planta. Esse modelo tem por característica a simulação do uso da sacarose pela planta podendo ser utilizada como carbono estrutural ou na respiração de manutenção. A fotossíntese diária total é determinada pela radiação fotossinteticamente ativa e a temperatura, calibrada pelos dados experimentais locais. A respiração é dividida em porções para manutenção e crescimento. Taxa constante para a respiração de crescimento e de manutenção é determinada utilizando uma função de acúmulo de biomassa e temperatura (SCARPARE, 2007).

Os trabalhos de Liu e Kingston (1995) e Keating et al. (1995) avaliaram o desempenho dos modelos QCANE APSIM e CANEGRO, demonstrando que o primeiro apresentou os menores erros na simulação da biomassa. Em algumas situações, o erro de QCANE era menor que a metade do erro do APSIM-Sugarcane na biomassa. As mudanças sazonais na biomassa seguiram muito próximas aos dados observados em outros estudos da validação com os dados australianos e havaianos (O'LEARY, 2000).

O QCANE modelo utiliza-se de valores diários de radiação solar, temperatura, estação do ano, latitude e comprimento do dia como base de cálculos, além de grande quantidade de conhecimentos e dados empíricos não publicados, com um grau muito elevado de empiricismo com várias experimentações e observações feitas em campo (LIU; BULL, 2001).

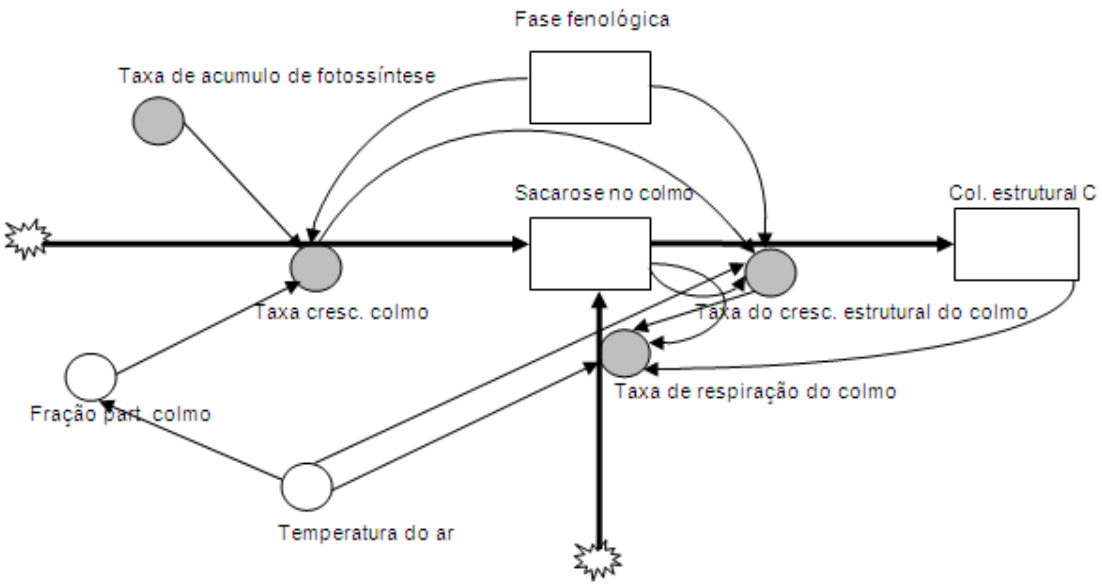

Figura 4 - Modelo conceitual utilizado no QCANE para estimativa do teor de sacarose (adaptado de LIU; KINGSTON, 1995)

O APSIM-Sugarcane (Figura 5) é um modelo que inclui uma coleção de módulos. Sua filosofia principal é separar os processos que ocorrem no solo dos processos das colheitas que são simuladas, seu enfoque é o solo, por isso a necessidades dos módulos adicionais para simularem outros processos, este modelo

utiliza uma grande quantidade de variáveis de entrada e muitos parâmetros e coeficientes, apesar de ser considerado reducionista.

O módulo APSIM-Sugarcane simula a fixação de carbono utilizando a eficiência do uso da radiação em função da temperatura do ar e com os teores de nitrogênio desvinculada da transpiração. Em circunstâncias onde não ocorre o estresse hídrico, a produção diária da biomassa é dividida de forma que parte vai para a folha, caule e raízes, por várias frações constantes, com taxas que variam segundo a fase fenológica. Em caso de estresse, o APSIM-Sugarcane utiliza-se de métodos de simulações adotados por outros modelos de forma que o crescimento da área foliar é reduzido mais rápido, e mais severamente, do que o crescimento do colmo. Com APSIM, a simulação da água do solo é fornecida por uma conexão em cascata ou de balanço hídrico, de um modelo de potencial de água disponível (O'LEARY, 2000).

O desempenho do APSIM-Sugarcane foi avaliado através de uma escala diversa dos ambientes da Austrália, África do Sul e EUA com bom desempenho, obtendo-se R^2=0,93 para a relação entre produtividade estimada pelo modelo e observada em campo (KEATING et al., 1999). No desenvolvimento deste modelo, foi utilizada grande quantidade de dados obtidos em variadas condições de campo, tornando-o robusto em diversos tipos de ambientes, mas especialmente em condições irrigadas (O'LEARY, 2000).

As principais variáveis utilizadas neste modelo são: radiação solar, temperatura do ar, parâmetros genéticos da variedade, dados de solo e de manejo. Ele também utiliza outros módulos mais específicos para se quantificar o estresse hídrico, como também a limitação de nitrogênio (KEATING et al., 1998).

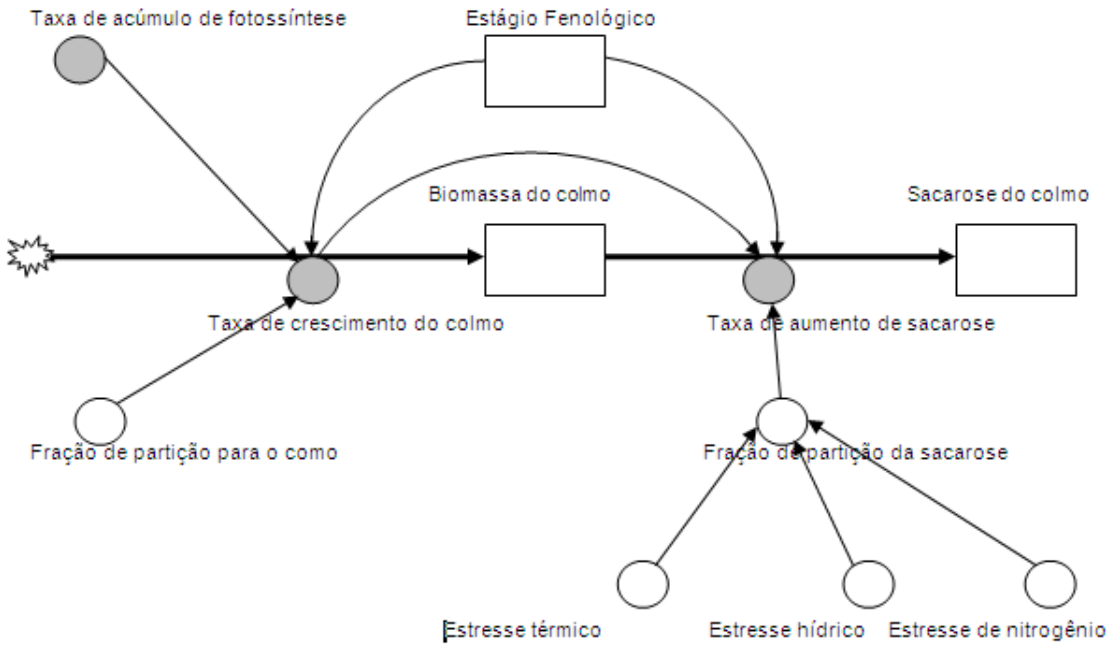

Figura 5 - Modelo conceitual do APSIN-Sugarcane para estimativa do acúmulo de sacarose (adaptado de KEATING et al., 1999)

Na década de 1980 iniciou-se um esforço para a constituição de um sistema integrador de modelos por um consorcio de universidades e instituições de pesquisa. Desde então, o DSSAT vem sendo largamente utilizado em todas as regiões do mundo. No inicio de seu desenvolvimento, os modelos implementados foram o CERES para o milho (JONES; KIRINY, 1986) e para o trigo (RITCHIE et al., 1985), o SOYGRO para a soja (WILKERSON et al., 1983) e o PNUTGRO para o amendoim (BOOTE et al., 1986), estes modelos apresentavam os recentes sucessos (JONES et al., 2003).

A base de dados do DSSAT reúne dados meteorológicos - temperatura..., dados pedológicos, medidas experimentais de campo, parâmetros genotípicos de espécie, eco tipo e variedade. O DSSAT utiliza uma interface amigável com usuário e é disponibilizado pelo Consórcio Internacional para Aplicação de Sistemas Agrícolas – (ICASA).

Em 2008, a versão 4.5 do DSSAT foi lançada incorporando modificações importantes tanto nas ferramentas para manipulação de dados como na estrutura dos modelos disponíveis. Uma das principais alterações foi a atualização do modelo

CANEGRO, que vinha apresentando problemas nas versões anteriores, com um grande incremento em seu desempenho e melhorias realizadas por Singels e Jones (2007).

Seguindo outra abordagem, um modelo relativamente simples e que tem sido largamente muito utilizado para estimativa em escala regional (inicialmente a proposta deste modelo era para escala continental, com o tempo, acabou sendo adaptado a escalas menores) é o Método da Zona Agroecológica, proposto por Doorembos e Kassan (1979) com base no trabalho de De Wit (1965). Este modelo permite estimar a produtividade potencial de uma cultura numa região, em função da radiação solar e da temperatura do ar. Além disso, essa produtividade potencial pode ser penalizada pelo déficit hídrico, expressa em função do déficit de evapotranspiração relativa, e de um coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico. É um dos mais empregados quando a finalidade é estimar a redução do rendimento de culturas em função das condições hídricas.

Nas condições reais de cultivo, ocorrerão perdas de rendimento devido a diversos fatores, entre eles: as condições climáticas adversas, problemas ou falta de manejo do solo, ervas daninhas etc. As limitações são em geral muito complexas e seus efeitos são difíceis de serem quantificados, mas o rendimento potencial quando comparado com o rendimento real obtido em campo, pode dar uma boa indicação da eficiência da produção agrícola (DOOREMBOS; KASSAN, 1994).

Apesar de suas limitações, pela sua simplicidade e bom desempenho, tem sido usado bastante e recomendada sua utilização para condições de deficiência hídrica relativa de no máximo 50% (DOOREMBOS; KASSAN, 1994), este método a princípio, teve como objetivo calcular o rendimento da cultura em base continental, mas o método também pode ser aplicado em menores escalas em nível de detalhe necessário para ajustar a localidades específicas.

De acordo com seus autores, para um determinado clima, o rendimento potencial de uma cultura padrão é calculado aplicando o conceito de De Wit (1965) que utiliza os dados de radiação e para culturas agrícolas sendo feitas correções para os processos de crescimento geneticamente controlado sobre o clima. Sendo assim, supõe-se que sejam satisfeitas as necessidades climáticas e de água da cultura, os nutrientes, a salinidade, as pragas e doenças não são considerados, supondo-se uma

condição ideal e ótima para todo o ciclo da cultura. Este modelo é uma ferramenta útil para interpretar as flutuações de rendimento entre anos distintos e entre regiões, além de proporcionar uma base quantitativa para definição das melhores épocas de semeadura (MOTA, 1981).

3.7 Análise espacial de dados geográficas aplicados à agricultura

O tratamento das informações espaciais ou georreferenciadas é um requisito necessário para coordenar e ordenar a ocupação das unidades físicas do meio ambiente. Para acompanhar o ritmo veloz da ocupação de áreas agrícolas, suas culturas e formas de utilização, é preciso se dispor de técnicas que provêm referências espaciais de ordenação destes processos de ocupação agrícola, passíveis de tratamento automatizados (ASSAD; SANO, 1993).

Um SIG é um sistema constituído por hardware, software e procedimentos, construído para suportar a captura, gestão, manipulação, análise, modelação e visualização de informação referenciada no espaço, com o objetivo de resolver problemas complexos de planejamento e gestão que envolve a realização de operações espaciais (ABRANTES, 1998a).

A interpolação é um método que permite construir um novo conjunto de dados – ou um plano de informação – a partir de um conjunto discreto de dados pontuais conhecidos. Em engenharia e ciência, dispõe-se habitualmente de dados pontuais, obtidos a partir de uma amostragem ou experimento e uma questão que normalmente se apresenta é a necessidade de se construir uma função que aproximadamente se "encaixe" nestes dados pontuais e permita gerar mapas para análise da variabilidade espacial.

Um dos métodos de interpolacao é a a interpolação linear, que consiste em aproximar uma função num intervalo utilizando de polinômios de primeiro grau. O principal problema é que se os pontos forem poucos ou muito afastados entre si, a representação gráfica para uma determinada função não seria muito bem representada por tal método, sendo necessário, talvez, a utilização de polinômios de graus mais elevados (ABRANTES, 1998b).

Na interpolação polinomial, utiliza-se funções interpoladoras escolhidas pela sua simplicidade e por permitirem uma representação satisfatória da variabilidade espacial da grandeza mapeada.

Devido a sua base matemático-estatística bem elaborada a krigaggem (KRIGE, 1951) é tido como um método confiável para a interpolação, desde que suas premissas teóricas sejam respeitadas. Trata-se de um interpolador que pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não tendenciosidade e mínima variância (GONÇALVES, 1997; SILVA JUNIOR, 2001). Segundo estes autores, este método pode ser entendido como uma predição linear ou uma forma da Inferência bayesiana, sendo muito utilizado para um número alto de dados e com boa distribuição espacial.

Nos casos em que os dados não obedeçam às exigências para a aplicação da krigagem, tem-se métodos mais simples para a geração de mapas. O método do inverso do quadrado das distâncias pode ser usado para diferente tipos de dados, apresentando certos inconvenientes que não ocorrem quando se utiliza a interpolação geoestatística.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição dos dados

O presente trabalho foi desenvolvido para análise espacial da eficiência da produção agrícola no Estado de São Paulo, cuja área é de 248.209.426 km^2 com 645 municípios. Segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2008), havia 3.284.681 ha ocupados com cana-de-açúcar no Estado, produzindo um total de 269.134.237 t com um rendimento médio de 81,9 kg ha^{-1}.

Foram utilizados dados de produtividade observada obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponíveis no Sistema de Recuperação Automática (www.sidra.ibge.gov.br), para as safras de 1990/1991 até 2006/2007, considerando todos os municípios do Estado de São Paulo.

Os dados meteorológicos necessários para as estimativas foram obtidos junto ao Sistema de Monitoramento Agrometeorológico do Brasil – Agritempo (EMBRAPA INFORMATICA AGROPECUARIA, 2002), sendo as séries de dados foram constituídas de modo a simular três diferentes condições de manejo em cada safra. A primeira, compreendida entre abril e março do ano seguinte, buscando representar uma soqueira de corte precoce; a segunda entre julho de um ano até junho do ano seguinte, representando as soqueiras de corte no meio da safra; e a terceira, entre outubro e setembro, representando as áreas de colheita tardia. Para cada safra, o valor final de produtividade foi considerado como a média aritmética dessas três simulações.

Buscando incluir o solo nas simulações, inseriu-se uma correção no procedimento de cálculo acima descrito, buscando diferenciar os ambientes pedológicos quanto à sua aptidão para cana-de-açúcar. Assim, foi utilizado o conceito de ambiente de produção discutido em Prado (2005) (ver Tabela 1) em associação ao mapa de aptidão agrícola para cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo produzido por Ramos et al. (2007) (Figura 6). A Tabela 1 apresenta as correções aplicadas às estimativas do modelo agrometeorológico, reduzindo os valores estimados em decorrência das limitações de solo. Essas correções foram obtidas a partir da proposta de Prado (2005), que estabeleceu diferentes faixas de produtividade em função do ambiente de produção que, por sua vez, leva em conta o tipo de solo. Neste trabalho,

as faixas de produtividade foram normalizadas em relação ao valor máximo apresentado por Prado (2005), obtendo-se então valores relativos que representariam a perda de produtividade potencial em função do tipo de solo.

Tabela 1 - Fatores de correção para produtividade estimada em função do tipo de solo

Aptidão	Fator de correção
Boa	1,00
Regular	0,94
Restrita	0,84
Inapta	0,74

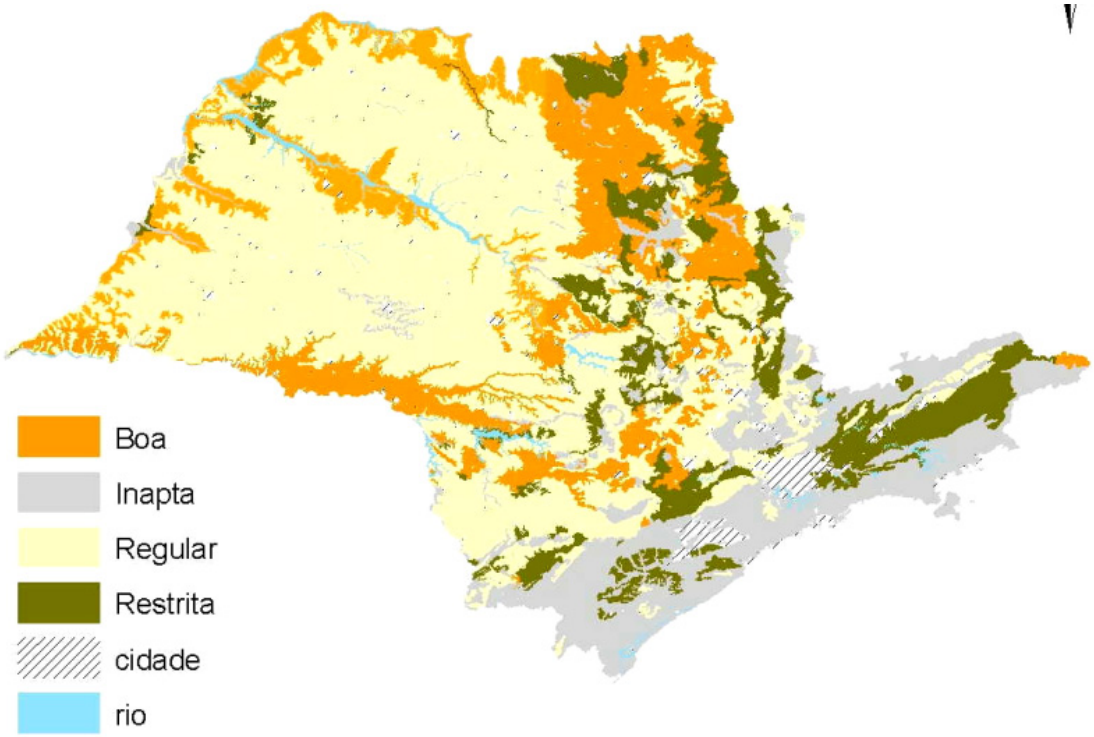

Figura 6 - Aptidão agrícola das terras no Estado de São Paulo
Fonte: Ramos et al. (2007)

4.2 Geração dos mapas de eficiência e ponderação da importância relativa do solo e clima

A determinação da eficiência da produção agrícola segundo a adaptação aqui proposta foi feita pela “divisão” dos valores de cada pixel da imagem referente à

produtividade observada (gerada a partir dos dados do IBGE) pelos valores de cada pixel correspondente da imagem referente à produtividade atingível estimada. Assim, a partir das imagens de produtividade observada e atingível, gerou-se uma terceira imagem correspondente à eficiência produtiva da cana de açúcar. Esse procedimento foi repetido para cada safra, obtendo-se um conjunto de 16 mapas de eficiência produtiva para o período analisado.

Para a ponderação da importância relativa do solo sobre a eficiência da produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, utilizando técnicas de geoprocessamento, obteve-se um valor médio de eficiência produtiva para cada município do Estado de São Paulo e para cada ano agrícola. Com base nesse conjunto de valores, fez-se a análise de correlação entre os valores de eficiência e a aptidão do solo, quantificando-se a fração da variabilidade espacial da eficiência de produção agrícola da cana que poderia ser explicada a partir da aptidão dos solos do Estado de São Paulo. Para tanto, as classes de aptidão de solo foram convertidas em valores de 1 a 4, correspondente às classes boa, regular, restrita e inapta, respectivamente. Com isso, criou-se um par de dados compostos pela eficiência e pelo tipo de solo, para cada município e ano agrícola. A análise estatística propriamente dita para o solo foi feita com o método de Spearman (SNEDECOR; COCHRAN, 1982), desenvolvido para análise de correlação de variáveis discretas, como é o caso do solo neste trabalho.

Para as demais variáveis – temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação anual, deficiência hídrica e radiação solar – repetiu-se o procedimento acima descrito, utilizando-se o método de Pearson (SNEDECOR; COCHRAN, 1982), para a quantificação da correlação entre a eficiência da produção agrícola e as variáveis supra-citadas.

Os mapas de produtividade atingível e produtividade observada foram gerados utilizando o método do inverso do quadrado das distâncias, empregando o módulo de geoestatística do software Arc View 9.2 (ESRI, 2004).

O mesmo software foi utilizado para os cálculos algébricos entre os diferentes mapas obtidos através da ferramenta *Raster Calculator*, permitindo que as análises específicas para cada uma das safras fossem feitas de modo integrado, através dos mapas, e não pontualmente, estação por estação. Essa possibilidade também permitiu,

para cada plano de informação estudado, atribuir um valor para cada município do Estado de São Paulo e não apenas para os locais que possuam estações meteorológicas, como foi feito por Marin et al. (2008).

Os mapas de deficiência hídrica anual foram obtidos com o balanço hídrico climatológico (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), utilizando uma capacidade de água disponível (CAD) de 80 mm (SMITH, 2005).

Como o modelo de simulação de cultura exigiu emprego de dados meteorológicos decendiais, e os dados provenientes das estações meteorológicas apresentam problemas nas séries históricas, seja por quebra ou mau funcionamento de equipamento ou desativação temporária da estação, utilizou-se o software WGEn (*Weather Generator)* (RICHARDSON; WRIGHT, 1984) para completar as séries de dados entre 1990 e 2006. Segundo avaliação feita por Sentelhas et al. (2001), o software apresentou bom desempenho nas condições brasileiras.

4.3 Estimativa da produtividade potencial (PP) da cana-de-açúcar

A estimativa da produtividade potencial foi feita através do Método da Zona Agroecológica desenvolvido por Doorembos e Kassan (1994) e adaptada por Marin et al. (2008) para estimativa na escala decendial, utilizando dados de radiação solar e temperatura média do ar.

A produtividade potencial da cultura é dada em kg ha^{-1} (massa seca) de acordo com a equação (6), cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 2.

$$PP = PPB\ Ciaf\ Cresp\ Ccol\ Cum\ ND \quad (t\ MS\ ha^{-1}) \qquad (6)$$

em que: PP é a produtividade bruta de matéria seca de uma cultura padrão, dada em kg MS $ha^{-1}d^{-1}$; Ciaf é o coeficiente de correção para o índice de área foliar (IAF); Cresp é o coeficiente para a correção da respiração; Ccol é o coeficiente de correção para a parte colhida ou índice de colheita; Cum é o coeficiente para a correção da umidade da parte colhida e ND é o número de dias considerados ou ciclo total da cultura.

Tabela 2 - Valores utilizados índice de área foliar (IAF, adimensional) coeficiente de cultivo (Kc, adimensional) e os coeficientes de sensibilidade a seca (λ, adimensional) e a respectiva duração da fase, representada por dias após o plantio (DAP, dias)

Fase	DAP (dias)	IAF	Kc	λ
Estabelecimento	30	1	0,5	0,43
Des. Vegetativo 1	150	3	1	0,43
Des. Vegetativo 2	330	5	1,2	0,39
Maturação	360	4	0,9	0,07

Adaptado de Doorembos e Kassan (1994), Dewit (1965) e Jensen (1968)

4.3.1 Cálculo da produtividade potencial bruta (PPB)

A estimativa da produtividade potencial bruta foi feita utilizando-se um modelo empírico baseado em dois aspectos principais. O primeiro é uma derivação do "Método das Zonas Agroecológicas-FAO33 (DOOREMBOS; KASSAN, 1979), considerando-se que a produtividade seja condicionada apenas pelas características da cultura e pelas condições ambientais, representadas pela radiação solar e temperatura do ar. A equação 10 se trata de uma adaptação do modelo original de Doorembos e Kassan (1979) para estimativa da produtividade potencial bruta em escala decendial (MARIN et al., 2008).

$$PPB = -6{,}2501 + 0{,}2187\ Rs + 0{,}3304\ T \qquad (t\ ha^{-1}\ 10\ dia^{-1}) \qquad (7)$$

em que: T é a temperatura média do ar no decêndio (ºC); e Rs é a radiação solar global média no período (MJ m^{-2} d^{-1}).

4.3.1.1 Irradiância solar global (Rs)

Como há poucos locais que dispõem de equipamentos de medida de radiação solar global (Rs), e essa é uma variável de grande importância na determinação da PPB, a radiação solar global foi estimada segundo o método de Hargreaves (1985) (equação 8), utilizando dados de temperatura máxima (TM) e mínima (Tm) do ar, e dados de radiação solar incidente no topo da atmosfera, estimado teoricamente a partir da latitude do local e da época do ano.

Esse método foi testado por Conceição e Marin (2007) para as condições brasileiras, com bons resultados, seguindo os trabalhos de Podesta et al. (2004) e Liu e Scott (2001).

$$Rs = Ra\ Kt\ (TM - Tm)^{0,5} \quad (\text{MJ m}^{-2}\ \text{dia}^{-1}) \qquad (8)$$

em que: Rs é a radiação solar global (MJ m^{-2} dia^{-1}); Ra é a radiação solar incidente no topo da atmosfera (MJ m^{-2} dia^{-1}); Kt é um coeficiente empírico (º$C^{-0,5}$), sendo 0,16 para regiões continentais (ALLEN et al., 1998); TM e Tm são as temperaturas máximas e mínimas do ar (ºC). Os valores diários de Ra foram calculados a partir das relações astronômicas envolvendo a latitude do local e época do ano.

4.3.2 Coeficiente para índice de área foliar (Ciaf)

Admitindo que a cana-de-açúcar tenha uma distribuição espacial esférica das folhas (DE WIT, 1965), e que a radiação solar atenua-se ao penetrar no dossel (BARBIERI, 1993) e, além disso, que essa distribuição (índice de área foliar ou IAF) varia de forma contínua desde a semeadura até a maturação em uma cultura real, foi necessário utilizar um fator de correção em função do índice de área foliar máximo (IAFmáx) que pode ser atingido durante o cultivo, sendo IAFmáx = 5, (ver Tabela 2) para uma cultura padrão. Dessa forma, é necessário um coeficiente de correção para ajustar o IAF (Ciaf) da cultura a condições próximas da realidade (GOUVÊA, 2008), podendo ser expresso, segundo Barbierl e Tuon (1992), pela equação (9):

$$Ciaf = 0{,}0093 + 0{,}185\ IAFmáx - 0{,}0175\ IAF^2 máx\ (IAFmáx \geq 5, Ciaf = 0{,}5) \qquad (9)$$

4.3.3 Correção da respiração (Cresp)

No processo de fotossíntese e do crescimento da cana-de-açúcar, há uma partilha de carboidratos, sendo uma parte destinada ao processo de fotorrespiração e a outra parte para a manutenção dos tecidos, ou seja, uma respiração de manutenção. Desta forma durante estes processos, há uma dependência e uma relação direta com a

temperatura ambiente e as taxas de respiração (GOUVÊA, 2008). Então, faz-se necessário uma correção para a respiração através de coeficientes na estimativa de um rendimento otimizado, podendo ser expresso pelas equações (10) e (11):

$$Cresp = 0{,}6 \ pata \ T < 20 \ ºC \tag{10}$$

$$Cresp = 0{,}5 \ para \ T \geq 20 \ ºC \tag{11}$$

em que: T é a temperatura média durante o período considerado.

4.3.4 Índice de colheita (Ccol)

De forma geral, apenas uma parte da matéria seca total é colhida por ser a parte realmente aproveitável, sendo o índice de colheita dado pela relação entre a matéria seca total e a economicamente rentável (DOOREMBOS; KASSAN, 1994)..

Para cana-de-açúcar, admite-se que 80% da matéria seca produzida pela cultura, seja destinada ao colmo, parte de interesse econômico da cultura. Assim, optou-se por utilizar Ccol = 0,8 citado na maioria dos trabalhos atuais que utilizam o modelo FAO-33 como em Gouvêa (2008) e sugerido por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002).

4.3.5 Coeficiente de umidade

Através dos cálculos citados acima, é possível obter-se a matéria seca da parte colhida, mas existe ainda uma umidade residual não computada que normalmente fica retida nas partes aproveitáveis da cana-de-açúcar. Estas duas partes (matéria seca da parte colhida e a umidade residual) apontam aquilo que é chamado de produtividade potencial final (PPF), ou seja, o potencial climático que ocorreria em condições ótimas sem nenhuma restrição hídrica, isso inclui um solo capaz de fornecer água na quantidade que a planta desejar (GOUVÊA, 2008)

Essa correção pode ser expressa pela equação (12):

$$Cum = (1 - 0{,}01\,U\%)^{-1} \qquad (12)$$

em que: U% = 80 para a cultura de cana-de-açúcar (DOOREMBOS; KASSAN, 1994)..

4.4 Cálculo da produtividade atingível (PA)

A deficiência hídrica foi considerada partindo-se do pressuposto que a irrigação não é utilizada nos canaviais Estado de São Paulo e que a produtividade estimada levará em conta a perda de rendimento decorrente da falta de chuva nas safras estudadas. Para tanto, foi empregado o modelo de Jensen (1968) modificado por Delgado-DELGADO ROJAS e Barbieri (1999) para penalização da produtividade potencial devido à deficiência hídrica (Equação 13).

$$\frac{PR}{PA} = \left(\frac{ETr1}{ETm1}\right)^{\lambda 1}\left(\frac{ETr2}{ETm2}\right)^{\lambda 2}\left(\frac{ETr3}{ETm3}\right)^{\lambda 3} \qquad (t\ ha^{-1}) \qquad (13)$$

em que: ETr e ETm correspondem, respectivamente, às evapotranspirações reais sob condições de sequeiro e máxima, cuja relação no modelo representa uma medida do suprimento hídrico (ORTOLANI et al., 1996). O coeficiente de sensibilidade da cultura é representado por , para os sub-períodos de: (1) brotação e estabelecimento (λ=0,43), (2) crescimento vegetativo (λ=0,39) e (3) maturação (λ=0,07), respectivamente.

Para a estimativa de ETr, foi utilizado o balanço hídrico seqüencial de cultura segundo Thornthwaite e Mather (1955), com coeficiente da cultura (Kc) e capacidade de água disponível (CAD) fixa em 80mm, adaptando-se Barbieri (1981) e Doorembos e Kassan (1979). Para a definição da CAD, foram consideradas a profundidade efetiva do sistema radicular para um solo com textura média, conforme proposto por Smith et al. (2005) .

4.4.1 Cálculo da Evapotranspiração Máxima da Cultura

O cálculo da ETc foi feito com a equação (14):

$$ETc = Kc\ ETo \qquad (14)$$

em que: Kc é o coeficiente de cultura e ETo é a evapotranspiração de referencia.

A evapotranspiração referência foi estimada utilizando o método de Camargo (1999), que propõem uma correção a fórmula de Thornthwaite (1955), levando em conta a amplitude térmica diária. Essa correção foi sugerida, principalmente, para melhoria do desempenho do método em climas áridos e super-úmidos, mas mostrou-se satisfatória também para as condições do Estado de São Paulo (CAMARGO et al., 1999).

$$ETo = 0{,}36\,(3Tmax - Tmin)\,0{,}01\,\frac{Ra}{2{,}45} \qquad \text{(mm dia}^{-1}\text{)} \qquad (15)$$

em que: Ra é a radiação incidente no topo da atmosfera, representa o calor latente de vaporização da água(2,45 MJ kg^{-1}); Tmax é a temperatura máxima (ºC) e Tmin é a temperatura mínima (ºC).

O coeficiente de cultivo (Kc) é determinado empiricamente, sendo utilizado para relacionar a ETc com a ETm, quando o suprimento de água atende plenamente as necessidades hídricas da cultura (DOOREMBOS; KASSAN, 1994). Os valores de Kc utilizados no presente trabalho estão apresentados na Tabela 2, juntamente com os demais parâmetros utilizados do modelo das zonas agroecológicas para estimativa da produtividade da cana.

4.5 Parametrização e validação do modelo

O Método da Zona Agroecológica (DOOREMBOS; KASSAN, 1979) foi calibrado para as condições climáticas e de cultivo do Estado de São Paulo, utilizando-se dados de produtividade observada da cana-de-açúcar das variedades RB7245, SP801842 e SP801816, cultivadas em Jaú, Jaboticabal, Quatá e Iracemápolis, SP, fornecidos por Gouvêa (2008). Foram utilizados dados relativos à cana-planta e cana-soca do primeiro e segundo cortes, durante quatro safras agrícolas, como mostra a Tabela 3. Com base nos dados da Tabela 3 avaliou-se o desempenho do modelo por meio de análise de

regressão linear, reservando-se aleatoriamente 1/3 dos dados para a validação do modelo.

Tabela 3 - Datas de corte e colheita, tipo de cultivo e produtividade de colmo de cana-de-açúcar observada em condições de campo

Local	Data do Plantio	Data do Corte	Tipo	Massa fresca de colmo (t ha^{-1})
Jaú	1/3/1999	1/5/2000	soca precoce	86,77
Jaú	1/3/2001	1/3/2002	soca precoce	100,3
Jaú	1/3/2001	1/9/2002	soca tardia	100,3
Jaboticabal	6/3/2000	6/6/2001	soca média	109,9
Jaboticabal	1/3/1999	1/9/2000	soca tardia	85,83
Jaboticabal	1/3/2001	1/6/2002	soca média	92,54
Jaboticabal	27/3/2002	27/6/2003	soca média	104,3
Jaboticabal	17/3/2002	17/10/2003	soca tardia	95,9
Jaboticabal	26/3/2002	26/8/2003	soca média	119,8
Jaboticabal	17/2/2003	17/6/2004	soca média	115,9
Jaboticabal	15/3/1999	15/6/2000	soca média	111,3
Quatá	13/4/1999	13/7/2000	soca média	82,18
Quatá	17/3/2000	17/10/2001	soca tardia	98,24
Quatá	15/3/2001	15/10/2002	soca tardia	88,57
Quatá	22/3/2001	22/7/2002	soca média	112,7
Quatá	17/3/2000	17/6/2001	soca média	107,7
Quatá	15/4/1999	15/6/2000	soca precoce	86,28
Iracemápolis	29/3/2001	29/6/2002	soca média	61,26
Iracemápolis	7/3/2001	7/6/2002	soca média	61,26
Iracemápolis	17/3/2001	17/7/2002	soca média	67,9

Fonte: Gouvêa (2008)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Validação do Modelo

A Figura 7 mostra o ajuste estatístico entre os dados simulados pelo modelo e os dados obtidos em condições de campo, indicando um erro sistemático por parte do modelo com tendência de superestimativa da produtividade de colmos em cerca de 40% (Figura 7a). Essa tendência de superestimativa pode ser associada ao fato de que, apenas a água é fator limitante, desconsiderando outros fatores também importantes definição da produtividade da cultura, como doenças, pragas, carências nutricionais e o manejo inadequado (DOOREMBOS; KASSAN, 1979).

Ainda que não tenha sido observado neste trabalho, outra limitação deste modelo consiste no fato dele depreciar a produtividade de forma irreversível em função do déficit hídrico, o que nem sempre é adequado para a cana-de-açúcar (TERAMOTO, 2003). Isso ocorre porque, dependendo da fase fenológica e da intensidade do estresse hídrico, a cultura pode recuperar-se após um período de deficiência hídrica, produzindo tanto quanto áreas que não experimentaram deficiência hídrica (ROBERTSON et al., 1999a).

A despeito dessas limitações, pode-se considerar que o modelo teve desempenho adequado para a proposta deste trabalho, que é analisar a produtividade da cana-de-açúcar na macroescala do Estado de São Paulo. Utilizando seis pares de dados selecionados aleatoriamente e utilizando a equação da reta obtida na análise de regressão da Figura 7a, pode-se perceber que o modelo passou a ajustar-se de modo satisfatório, explicando 67% da variabilidade dos dados de campo, com boa exatidão (Figura 7b). Nesta análise, o coeficiente linear da equação foi desprezada por não ser estatisticamente significativo a 1% de probabilidade.

Esse padrão de desempenho também foi observado por Barbieri (1993) e Gouvêa (2008) para cana-de-açúcar, assim como para outras culturas agrícolas (MARIN et al., 2000).

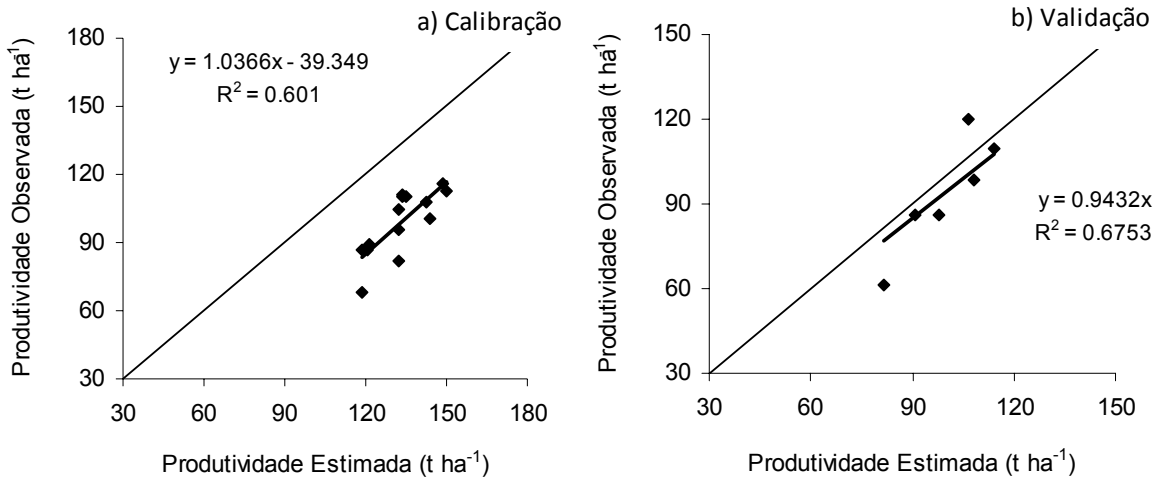

Figura 7 - Relação entre a produtividade estimada pelo modelo FAO-33 e a produtividade observada em condições de campo, sendo a) calibração empírica do modelo e b) a validação

Tabela 4 - Valores médios de produtividade e de desvio padrão para os dados observados em condições de campo, estimados com o modelo sem ajuste e após o ajuste estatístico do modelo

Produtividade	Valor médio e desvio padrão ($t\ ha^{-1}$)	
Média Observada	97,1	15,9
Média estimada sem ajuste	133,5	10,6
Média estimada ajustada	99,9	12,1

5.2 Análise da Produção Atingível e Produção Observada

As Figuras 8 e 9 apresentam os mapas de produtividade atingível e produtividade observada entre os anos de 1990 e 2006, ilustrando a variabilidade espaço-temporal dessas variáveis ao longo do período analisado. Pela Figura 8, pode-se observar a tendência de expansão da cultura da cana-de-açúcar para o Oeste do Estado de São Paulo**,** processo que aliou a busca por terras mais baratas em regiões com maior potencial produtivo para a cultura, substituindo, principalmente, áreas de pastagens degradadas e de baixa produtividade,), como abordado no item 5.6.

Esse processo continuou entre 2003 e 2006, movido pela grande demanda de álcool no mercado interno, provocando aumento de preços nas terras das regiões oeste e noroeste de São Paulo (FNP, 2005). Além do aumento de produtividade, a área cultivada com cana-de-açúcar no Estado cresceu mais de 60% ao longo do período devido à elevação na demanda de álcool e do aumento dos preços do açúcar no mercado internacional (MARIN et al., 2008), como também discutido no item 5.6.

Nos mapas apresentados na Figura 9, uma característica importante é a formação de polígonos circulares, muitas vezes incoerentes com o padrão de variação da produtividade de culturas agrícolas em condições de campo. Este fato se deve ao método de interpolação utilizado neste trabalho que, como já discutido no Material e Métodos, não exige premissas para sua aplicação, mas em contrapartida, tem dificuldade em gerar mapas que apresentam grande variabilidade espacial e padrões de variação não contínuos numa mesma direção. Neste trabalho, contudo, optou-se por manter os mapas na forma atual já que não se pretendia analisar a produtividade atingível, mas sim a eficiência da produção agrícola.

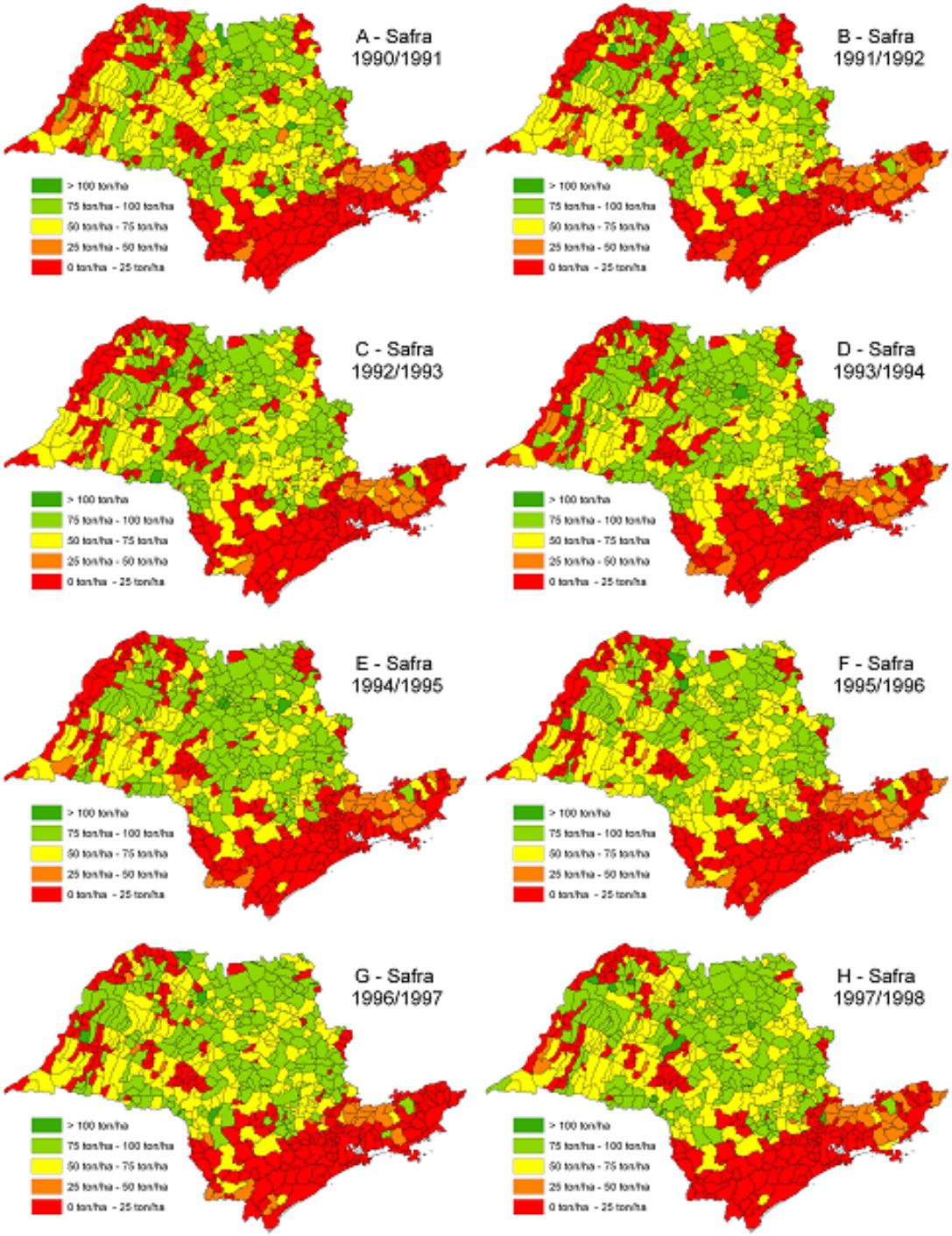

Figura 8 - Mapas de produtividade observada, gerados a partir de dados do IBGE, entre as safras de 1990/1991 e 2005/2006 (continua)

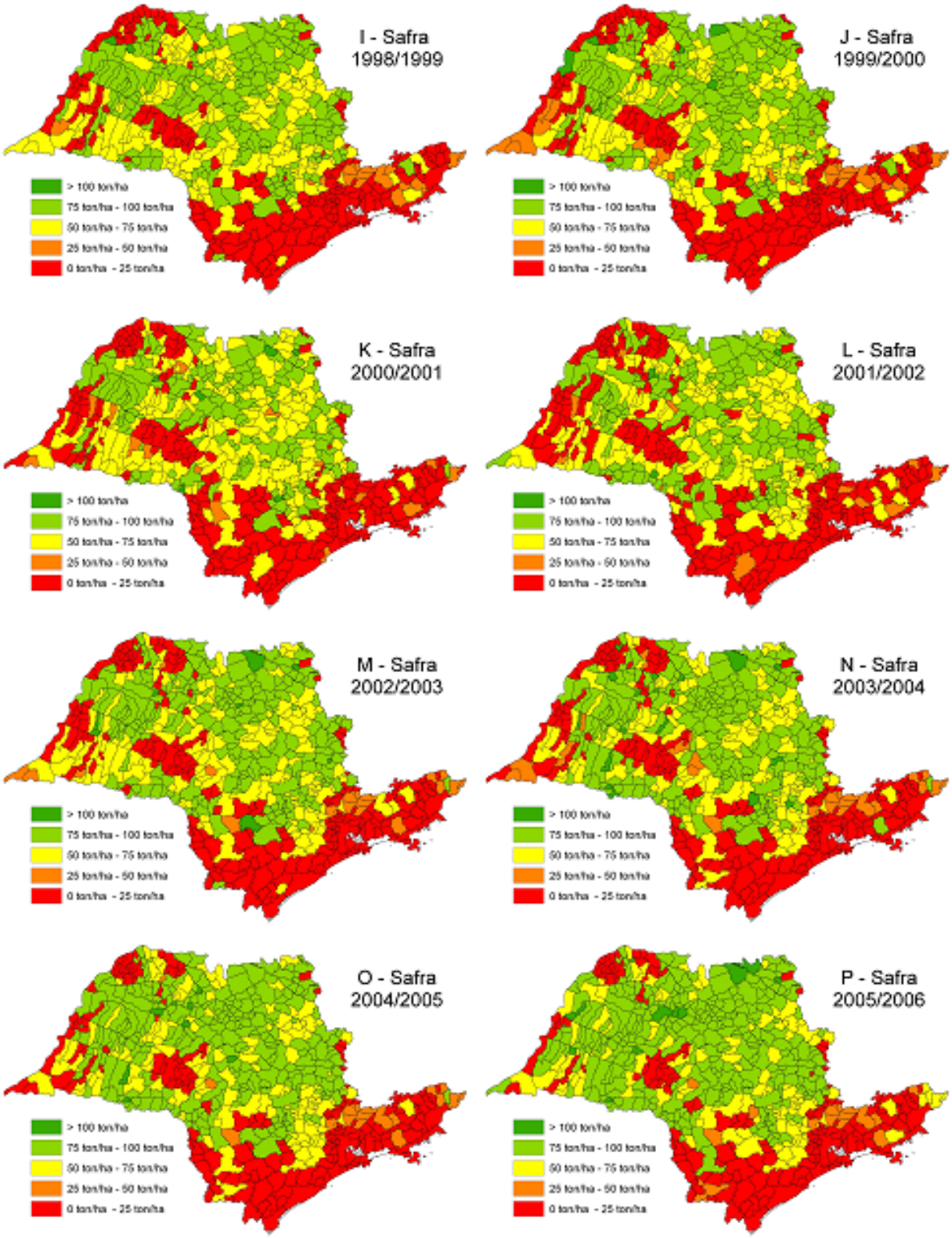

Figura 8 - Mapas de produtividade observada, gerados a partir de dados do IBGE, entre as safras de 1990/1991 e 2005/2006 (conclusão)

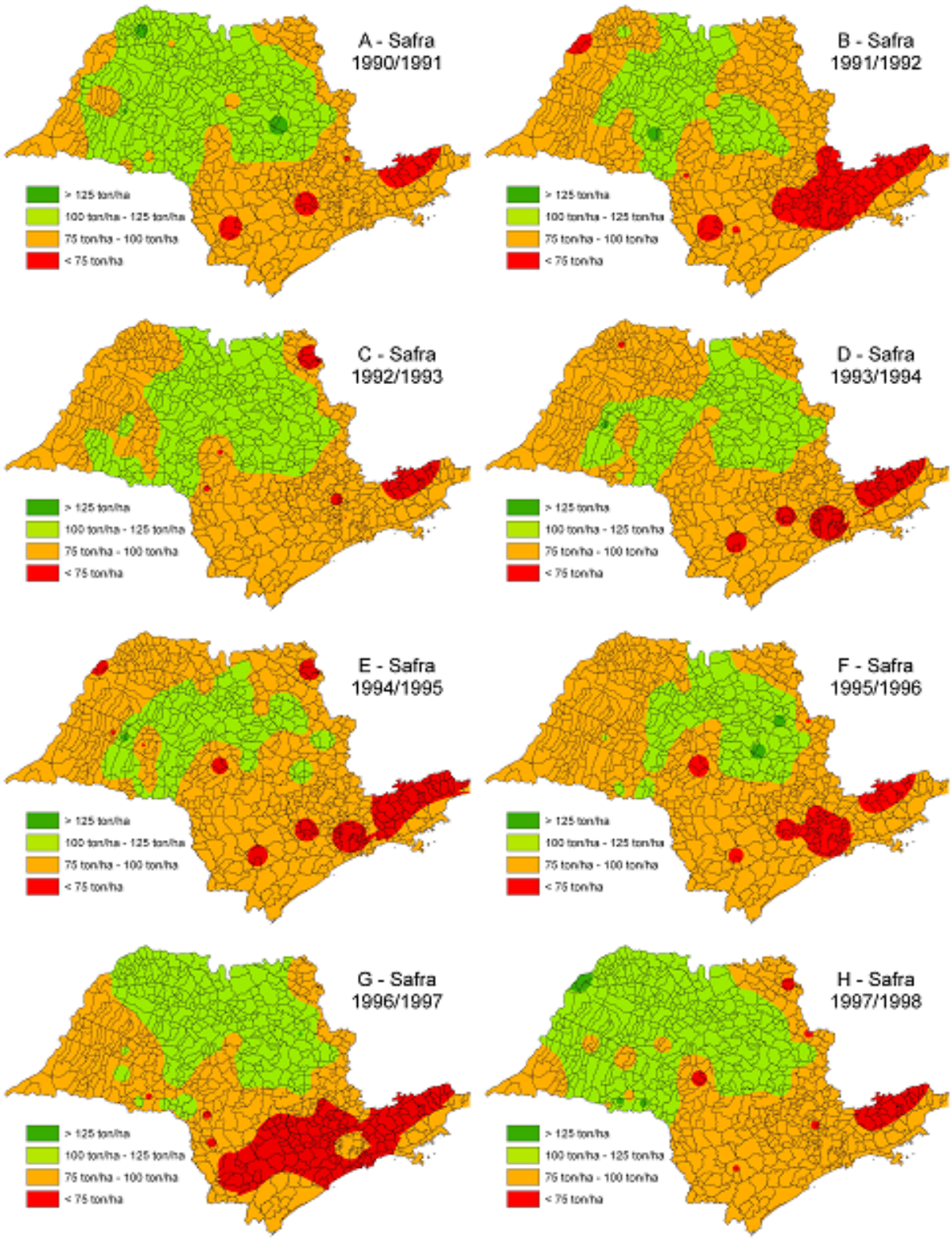

Figura 9 - Mapas de produtividade atingível, gerados a partir de estimativas do modelo proposto, entre as safras de 1990/1991 e 2005/2006 (continua)

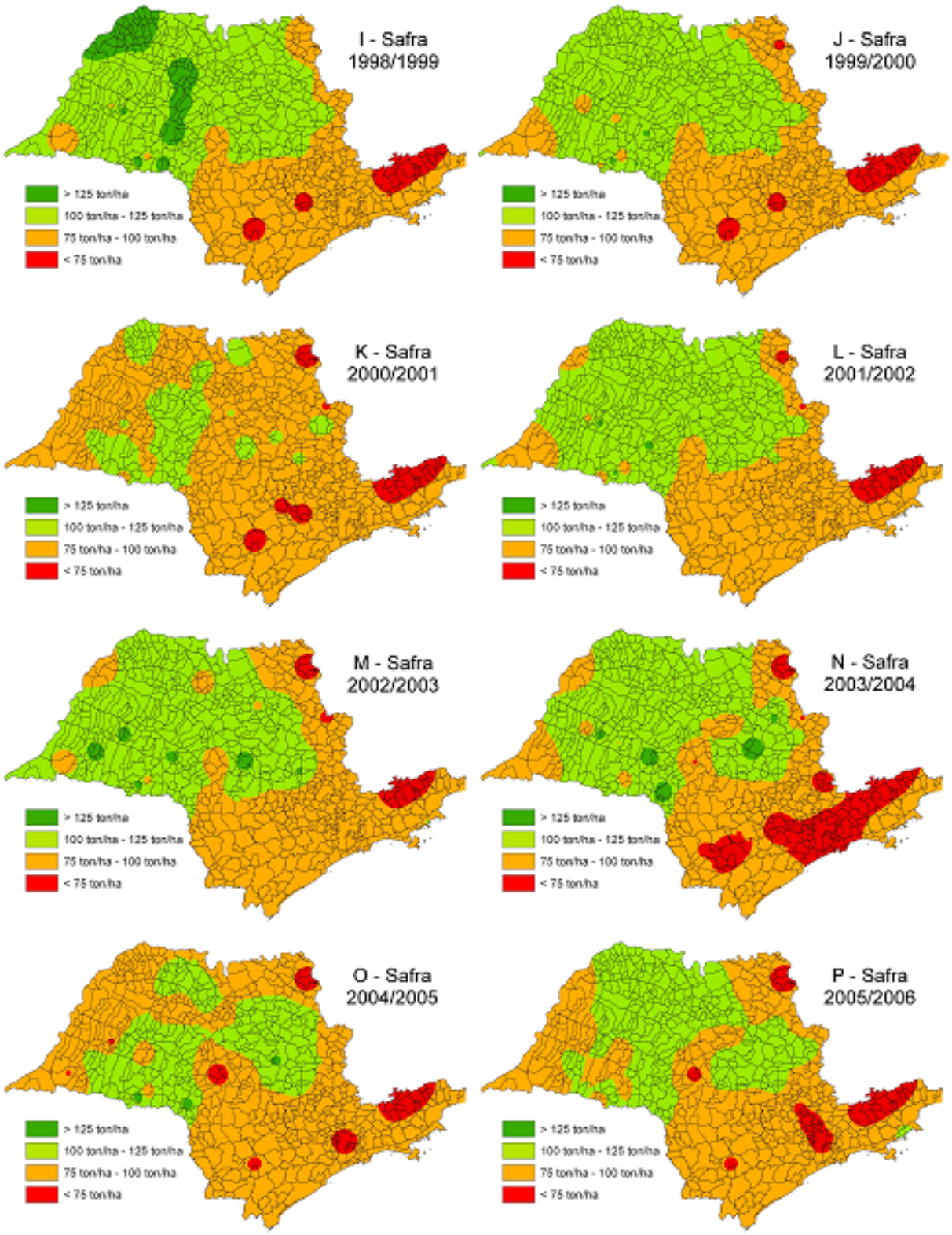

Figura 9 - Mapas de produtividade atingível, gerados a partir de estimativas do modelo proposto, entre as safras de 1990/1991 e 2005/2006 (conclusão)

5.3 Variação espaço-temporal da eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar

Considerando a média geral do Estado de São Paulo, a eficiência da produção de cana-de-açúcar subiu de 0,42 para 0,57 entre as safras de 1990/1991 a 2005/2006, com aumento da produtividade média do Estado de 12 t ha^{-1} no mesmo período (Figura 10, Tabela 5).

De acordo com a Tabela 5 e com a Figura 10, observou-se um aumento expressivo especialmente nos últimos seis anos da série analisada, provavelmente como resultado da expansão no consumo de etanol em decorrência, principalmente, do surgimento da tecnologia que possibilitou o uso de carros bi-combustíveis, da variação relativa dos preços do etanol e da gasolina e o aprofundamento das discussões envolvendo o uso de combustíveis renováveis, dando novo impulso ao etanol (GOLDEMBERG; 2007; MACEDO, 2007).

Da análise dos dados também foi possível verificar que, para cada ponto percentual de aumento na eficiência de produção de cana, tem-se um acréscimo de 0,8 t ha^{-1} em média para todo o Estado, o que representa um valor expressivo se considerada a área de cana-de-açúcar cultivada no Estado de São Paulo. Com isso, pode-se inferir que onde um aumento de 1% representa um aumento de cerca de 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Este dado também ganha importância na medida em que se discute a racionalização da expansão da cana-de-açúcar, uma vez que o aumento da produtividade poderia suprir em grande parte a demanda por açúcar e etanol no mercado interno e externo, minimizando a necessidade de expansão das áreas produtoras.

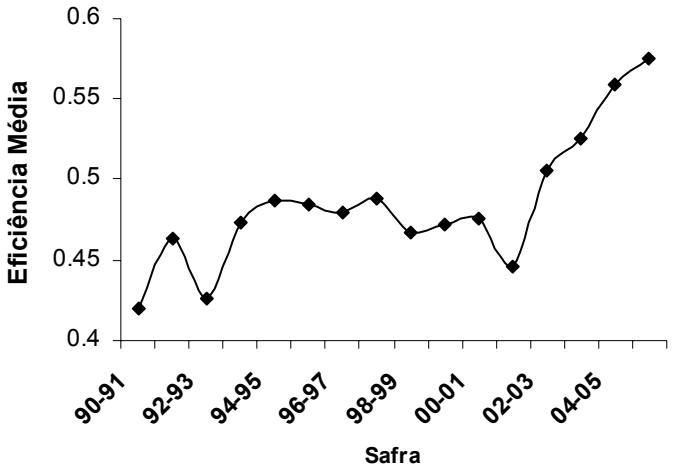

Figura 10 - Variação da média de eficiência de produção agrícola da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo da safra de 1990/1991 a 2005/2006

Tabela 5 - Eficiência média da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo da safra de 1990/1991 a 2005/2006

Safra	Eficiência
90-91	0,42
91-92	0,46
92-93	0,43
93-94	0,47
94-95	0,49
95-96	0,48
96-97	0,48
97-98	0,49
98-99	0,47
99-00	0,47
00-01	0,48
01-02	0,45
02-03	0,51
03-04	0,53
04-05	0,56
05-06	0,58
Média	**0,49**

Os mapas de eficiência da produção de cana-de-açúcar em São Paulo ao longo das 16 safras estudadas (Figura 11) indicam que a elevação da eficiência foi mais

expressiva nas regiões centro-oeste e norte do Estado de São Paulo, uma vez que a expansão das usinas ocorreu prioritariamente nessas regiões.

Entre as safras 1990/1991 e 1995/1996, a elevação na eficiência é pequena tendo em vista as condições macroeconômicas relativamente desfavoráveis à produção da cultura no período, principalmente devido à queda no preço e no consumo de álcool no país (GOLDEMBERG et al., 2007). A partir da safra 2002/2003, contudo, nota-se uma modificação no padrão de variação, com o início do novo ciclo do álcool no mercado nacional e também no exterior, favorecido principalmente pela alta no preço do petróleo e pelo incentivo a expansão da biomassa na matriz energética do Brasil (MARIN et al., 2008). Este contexto conjuntural será discutido com mais detalhe no item 5.6 deste trabalho.

De forma geral, pode-se notar uma tendência de elevação das áreas com maior eficiência (Figura 12d e 12e), e de diminuição as áreas de baixa eficiência (Figura 12b e 12c). Isso fica evidente na análise das Tabelas 6 e 7, onde se observa o crescimento expressivo nas áreas com eficiência acima de 70% ao longo do período analisado. Também é possível observar que e a área de alta eficiência (classe entre 0,8 e 1 de eficiência) saltou de 17610 km^2 para 68754 km^2 representando a intensificação do processo produtivo ao longo do período.

A variação da área em cada classe de eficiência pode ser atribuída também à expansão e à incorporação de novas áreas produtoras da cana-de-açúcar, como a região oeste do Estado (Figuras 11k, 11o e 11p), processo que se consolida nas quatro ultimas safras analisadas, já que envolve tempo e investimento na estrutura necessária e na correção do solo de menor qualidade do que na região norte e centro do Estado (Figura 6).

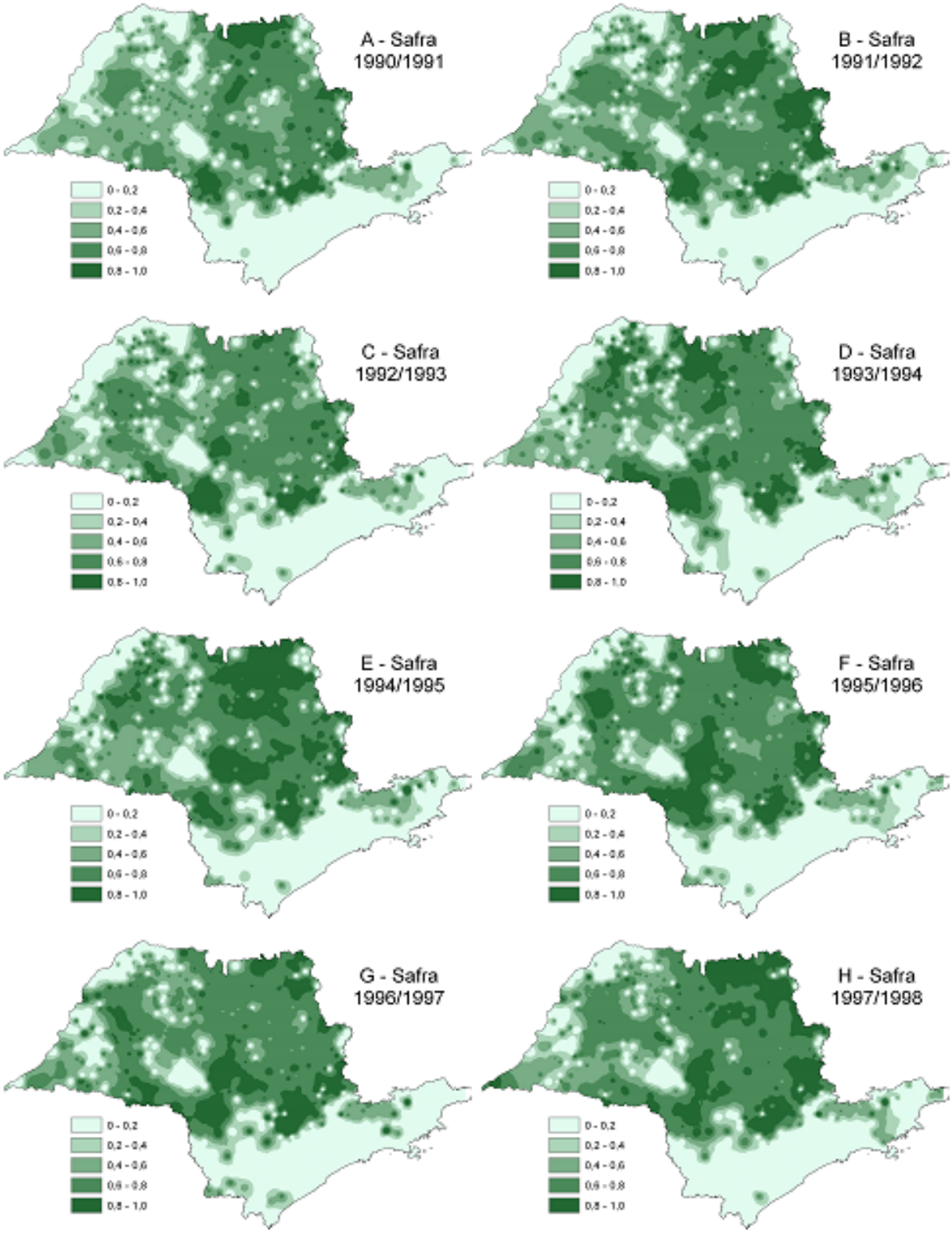

Figura 11 - Mapas de eficiência de produção agrícola no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006 (continua)

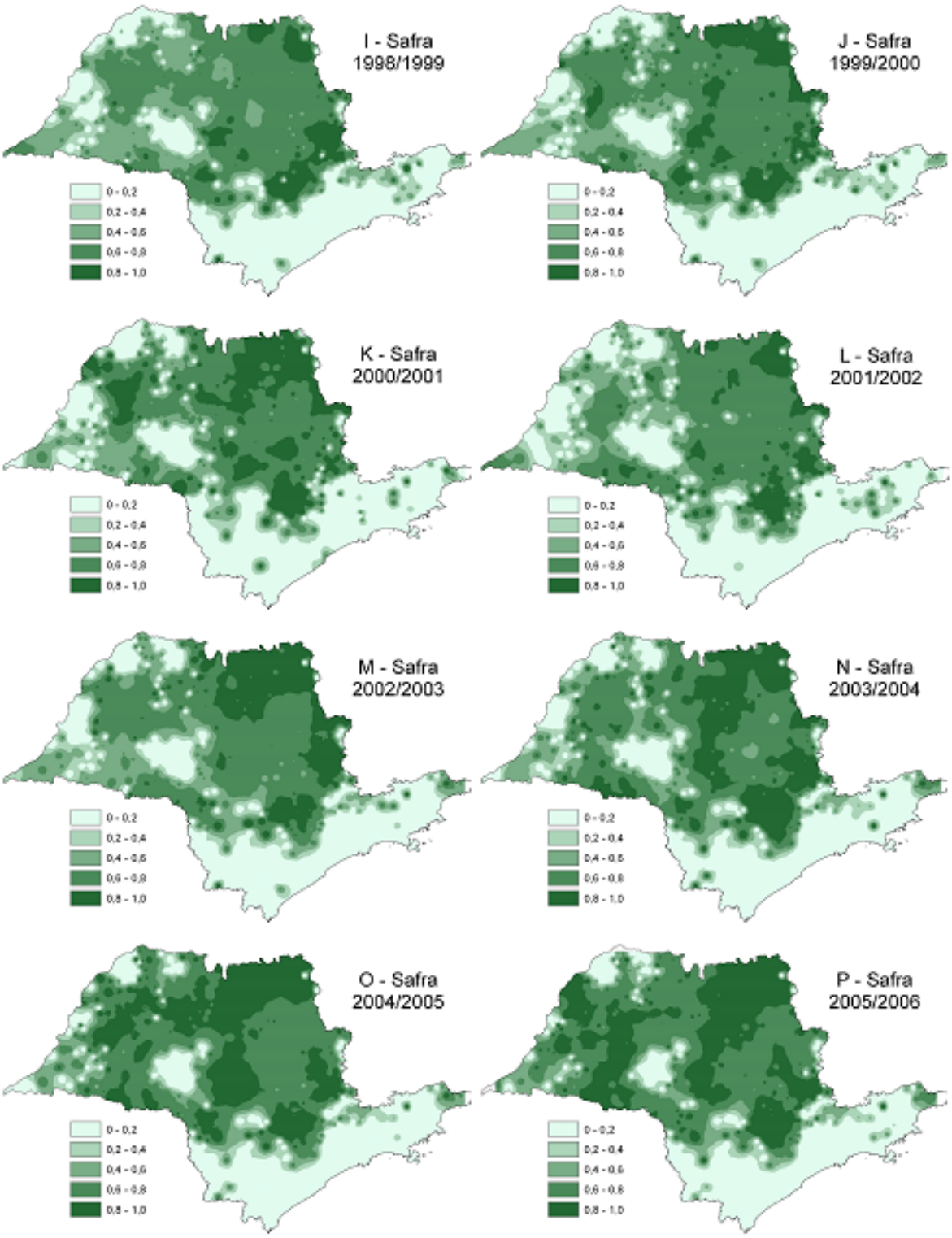

Figura 11 - Mapas de eficiência de produção agrícola no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006 (conclusão)

Tabela 6 - Distribuição de área (km^2) em cinco classes de eficiência de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006

	Safras							
Classes	**(90/91)**	**(91/92)**	**(92/93)**	**(93/94)**	**(94/95)**	**(95/96)**	**(96/97)**	**(97/98)**
0 - 0,2	74368,58	68162,59	75091,77	67202,34	65013,07	65226,04	67058,89	66000,05
0,2 - 0,4	31141,28	28129,34	32060,00	31230,00	29030,02	29085,89	26557,99	24243,65
0,4 - 0,6	60006,38	50706,07	48555,90	44222,61	42757,32	35303,28	37199,31	38014,88
0,6 - 0,8	65082,57	72108,11	76700,93	76103,29	67343,19	85220,14	86556,78	81450,28
0,8 - 1	17610,62	29103,32	15800,83	29451,18	44065,83	33374,08	30836,46	38500,56

	Safras							
Classes	**(98/99)**	**(99/00)**	**(00/01)**	**(01/02)**	**(02/03)**	**(03/04)**	**(04/05)**	**(05/06)**
0 - 0,2	67847,14	69054,83	76600,04	77018,19	66246,59	64055,25	60850,52	57088,17
0,2 - 0,4	23441,39	24970,00	25011,46	28592,90	23059,39	23036,99	19050,33	18367,49
0,4 - 0,6	47039,11	36472,83	31310,70	36012,38	39253,02	33009,59	23628,10	23083,47
0,6 - 0,8	90019,70	87012,89	72275,00	86085,40	80225,43	77207,31	79900,43	80916,29
0,8 - 1	19862,09	30698,87	43012,22	20500,56	39425,00	50900,29	64780,05	68754,01

Tabela 7 - Distribuição de área (%), normalizada em função da área total do Estado de São Paulo, em cinco classes de eficiência de produção de cana-de-açúcar entre as safras 1990/1991 e 2005/2006

	Safras							
Classes	**(90/91)**	**(91/92)**	**(92/93)**	**(93/94)**	**(94/95)**	**(95/96)**	**(96/97)**	**(97/98)**
0 - 0,2	29,96%	27,46%	30,25%	27,07%	26,19%	26,28%	27,02%	26,59%
0,2 - 0,4	12,55%	11,33%	12,92%	12,58%	11,70%	11,72%	10,70%	9,77%
0,4 - 0,6	24,18%	20,43%	19,56%	17,82%	17,23%	14,22%	14,99%	15,32%
0,6 - 0,8	26,22%	29,05%	30,90%	30,66%	27,13%	34,33%	34,87%	32,82%
0,8 - 1	7,10%	11,73%	6,37%	11,87%	17,75%	13,45%	12,42%	15,51%

	Safras							
Classes	**(98/99)**	**(99/00)**	**(00/01)**	**(01/02)**	**(02/03)**	**(03/04)**	**(04/05)**	**(05/06)**
0 - 0,2	27,33%	27,82%	30,86%	31,03%	26,69%	25,81%	24,52%	23,00%
0,2 - 0,4	9,44%	10,06%	10,08%	11,52%	9,29%	9,28%	7,68%	7,40%
0,4 - 0,6	18,95%	14,69%	12,61%	14,51%	15,81%	13,30%	9,52%	9,30%
0,6 - 0,8	36,27%	35,06%	29,12%	34,68%	32,32%	31,11%	32,19%	32,60%
0,8 - 1	8,00%	12,37%	17,33%	8,26%	15,88%	20,51%	26,10%	27,70%

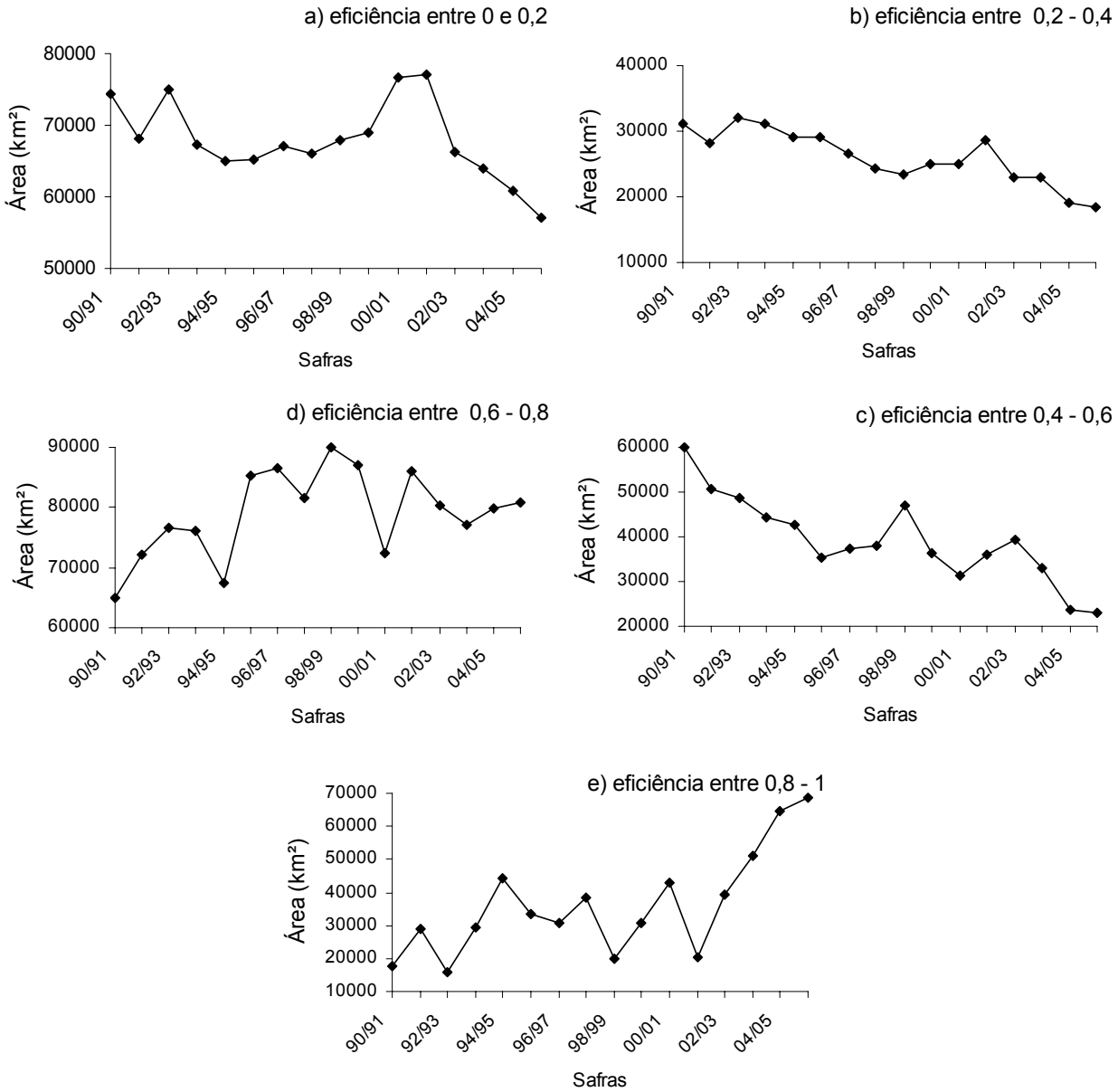

Figura 12 - Variação temporal da área (km^2) de cinco classes de eficiência de produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006

Como abordado no Capítulo Material e Métodos, para verificar qual a importância relativa do fator solo sobre a eficiência da produção agrícola da cana-de-açúcar aplicou-se o teste de Spearman (SNEDECOR; COCHRAN, 1982) analisando-se a correlação entre a eficiência média de cada município e o tipo de solo. Na seqüência, utilizou-se o teste de Pearson (SNEDECOR; COCHRAN, 1982) para proceder à análise

similar entre a eficiência e os dados de precipitação total anual, radiação solar média anual, temperatura máxima e mínima média anuais, e deficiência hídrica total anual.

A Tabela 8 apresenta o resultado dessa análise, descrevendo em que medida o solo e clima descrevem a variabilidade da eficiência da produção de cana-de-açúcar no Estado. Vale enfatizar que, na Tabela 8, o coeficiente atribuído ao fator clima é o resultado da soma dos coeficientes de Pearson de cada elemento analisado - precipitação, radiação solar, deficiência hídrica e temperatura máxima e mínima – e que as análises da Tabela 8 referem-se aos dados médios das 16 safras consideradas neste trabalho.

Tabela 8 - Valor médio em % da contribuição dos fatores que explicam a variabilidade da eficiência cana-de-açúcar do Estado de São Paulo do período de 1990 a 2006 para 637 municípios

Fator determinante	Importância Relativa
Clima (Coeficiente de Pearson)	0,43
Solo (Coeficiente de Spearman)	0,15
Total	0,58

As análises de correlação indicaram que o clima responde por cerca 43 % da variabilidade da eficiência da produção agrícola no Estado de São Paulo, enquanto que o solo é responsável por 15% dessa variabilidade. A Tabela 8 também informa que os fatores abióticos (clima e solo) respondem em conjunto por apenas 58% da variabilidade da eficiência da produção de cana-de-açúcar, donde supõem-se que fatores relacionados ao manejo da cultura e conjuntura socioeconômica relacionada ao setor sucroalcooleiro pode explicar até 42% da variabilidade da eficiência de produção de cana-de-açúcar (Figura 13).

Os 42% relacionados aos fatores além do clima e do solo, por sua vez, são muito dependentes de condições conjunturais e momentâneas, decorrentes de políticas públicas, preços de insumos, rentabilidade da atividade e situações especificas de mercado. Neste sentido, pode-se exemplificar com a variabilidade de preços pagos pela saca de cana-de-açúcar e a conjuntura sócio-econômica deste cultivar ao longo da

década de 90 até o ano de 2006 que passou por profundas modificações estruturais e normativas, como será discutido no item 5.6. Dentro deste contexto, também vale ressaltar que a tecnologia, o melhoramento genético e o avanço da fitotecnia da cana-de-açúcar estão incluídos neste percentual, embora sua quantificação não tenha sido realizada neste trabalho.

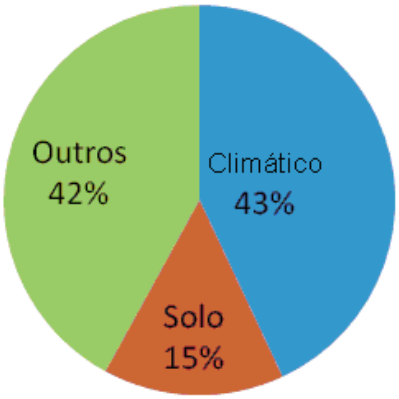

Figura 13 - Contribuição relativa (%) de cada fator na determinação da eficiência média da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

5.4 Relação entre os elementos climáticos e a eficiência da produção agrícola

Como já foi referenciado no tópico anterior, o conjunto dos elementos climáticos somados representam 43% da variabilidade da eficiência do Estado de São Paulo sendo este percentual resultado da análise individual dos elementos apresentados na Tabela 9, em conjunto com seus respectivos índices de correlação.

Nesta análise, foram considerados os cinco fatores mais representativos, selecionados por terem apresentados correlação significativa pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

Na Figura 15, pode-se observar a variabilidade temporal dos elementos climáticos analisados, notando-se a baixa variação ao longo da série analisada. Isso, por sua vez, se deve ao fato de que a Figura 15 retrata uma média geral do Estado ao longo das 16 safras analisadas, o que contribui para a redução da variabilidade observada.

Tabela 9 - Valores médios e desvio padrão para as 16 safras (1990/1991 – 2005/2006) para a precipitação, radiação solar, deficiência hídrica, temperatura máxima e mínima

Estatísticas	Precipitação.	Rad. Solar	Def. Hid.	T. Máx.	T. Min.
Média	1466,6	17,9	359,8	28,8	16,7
Desvio Padrão	83,2	0,1	34,7	0,3	0,3

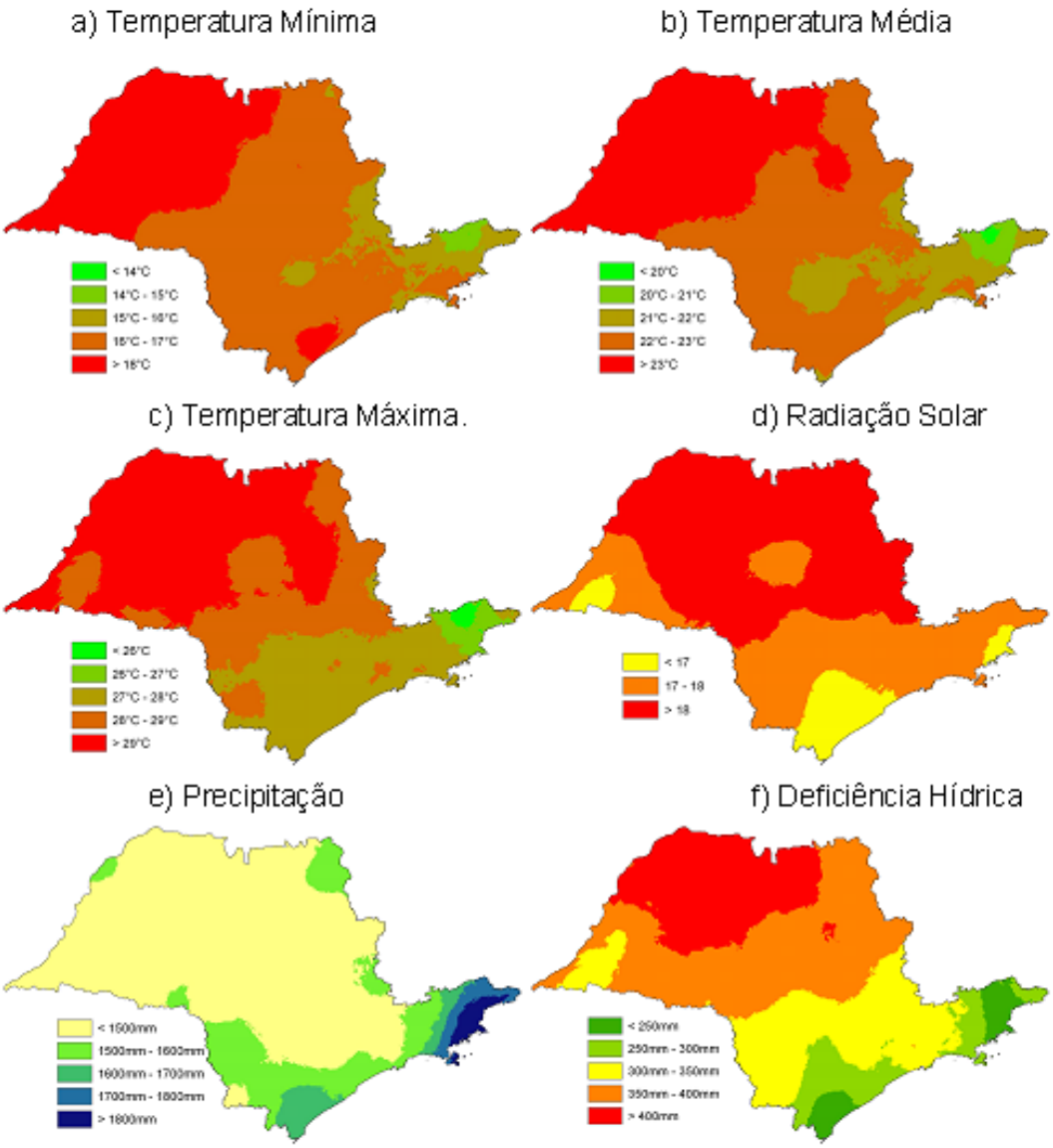

Figura 14 - Variação espacial da a) temperatura mínima (ºC), b) temperatura média (ºC), c) temperatura máxima (ºC), d) radiação solar global (MJ m^{-2} d^{-1}), e) precipitação (mm/ano) e e) deficiência hídrica (mm/ano), utilizando valores médios entre as safras 1990/1991 e 2005/2006

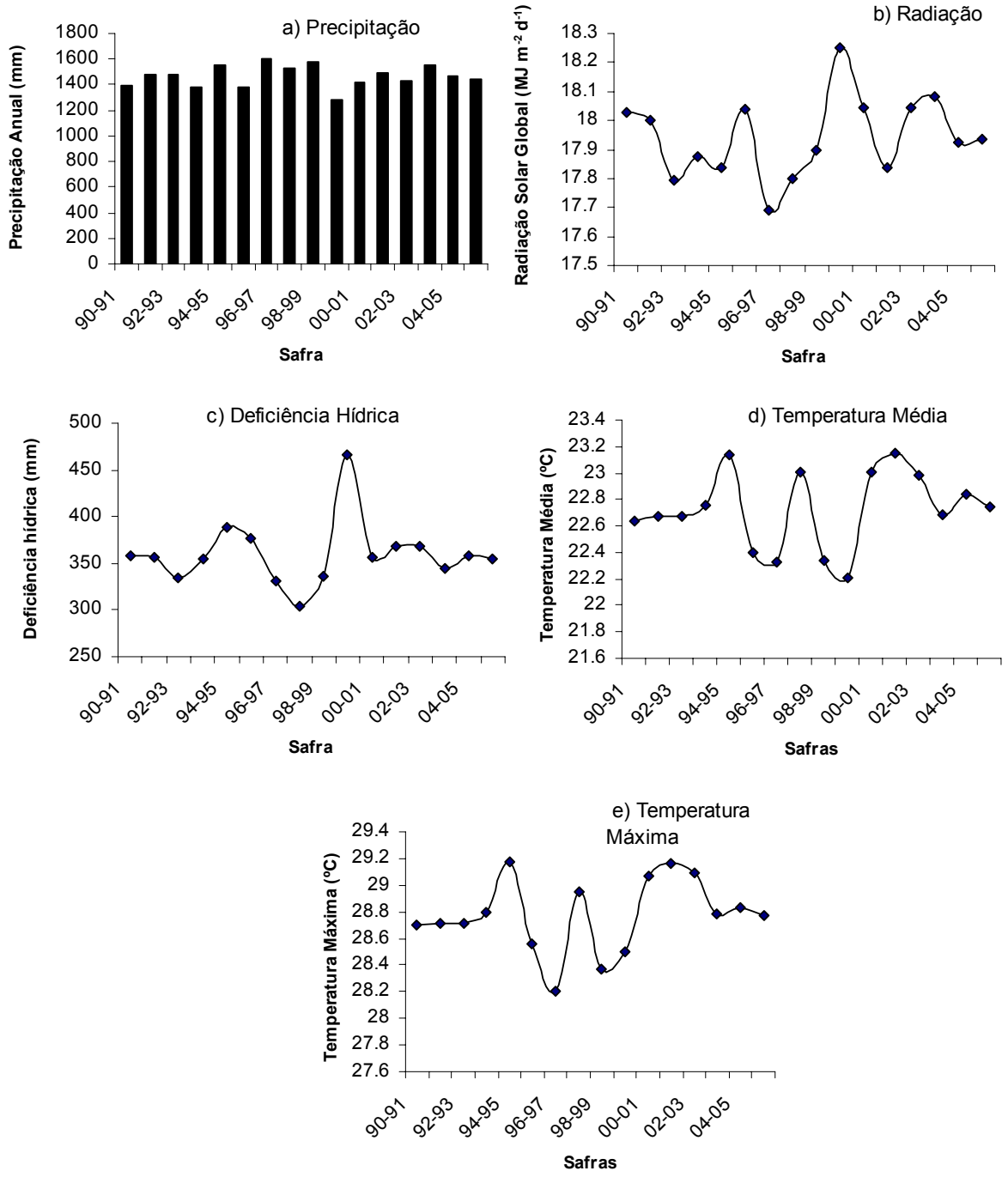

Figura 15 - Variação temporal dos valores médios estaduais de a) precipitação (mm/ano), b) radiação solar global (MJ m^{-2} d^{-1}); c) deficiência hídrica (mm/ano), d) temperatura mínima e, e) temperatura máxima (ºC), entre as safras 1990/1991 e 2005/2006

Tabela 10 - Coeficiente de Pearson (R^2) médio das 16 safras (1990/1991 – 2005/2006) para a precipitação, radiação solar, deficiência hídrica, temperatura máxima e mínima

Variável	R^2
Rad. Solar	0,16
Def. Hid.	0,12
T. Máx.	0,08
Precip.	0,06
T. Min.	0,01
Total	0,43

Os valores do coeficiente de Pearson (Tabela 10) permitem analisar a importância relativa de cada elemento do clima influencia a eficiência da produtividade da cana-de-açúcar no Estado.

É evidente, mas merece menção que os índices de correlação obtidos devem-se ao fato de que a radiação solar tem forte influência na formação do rendimento da cana-de-açúcar (CHEROO-NAYAMUTH et al., 2000; LISSON, 2005). Vale também lembrar que nas regiões do Estado de São Paulo onde a cana-de-açúcar é tradicionalmente cultivada nas últimas décadas, os ambientes de produção são, de modo geral, favoráveis a produção da cultura, especialmente no que concerne a distribuição anual das chuvas, deficiência hídrica, temperatura do ar e radiação solar (Figura 14 e Figura 15).

Em alguns estudos recentes, foi mostrado que a acumulação de sacarose no colmo da cana-de-açúcar é um processo mais contínuo e acentuado do que a resposta a deficiência hídrica ou a temperaturas baixas (LISSON, 2005), além de depender da fase fenológica em que o estresse hídrico ocorre (somente na fase de desenvolvimento vegetativo o estresse hídrico pode comprometer a produtividade da cultura de forma considerável), do tipo de plantio e do genótipo (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Assim, pode-se inferir que o fato da radiação solar apresentar a maior importância relativa nas análises realizadas é indicativo da influência relativamente baixa de fatores limitantes à produção agrícola da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Isso, por sua vez, permite à cultura responder de modo mais expressivo aos

fatores que contribuem para alta produtividade, como é o caso da radiação solar, uma variável que participa do modelo compondo a fotossíntese bruta.

A deficiência hídrica foi segundo fator em ordem de importância (Figura 14e, Figura 15c), a despeito do papel preponderante da água no desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar, com efeito negativo sobre o crescimento da cultura durante as fases iniciais de desenvolvimento) e desempenhando função especial na ativação acúmulo de sacarose no colmo durante a fase de maturação (KEATING et al., 1999; CHEEROO-NAYAMUTH et al., 2000).

Como discutido em Marin et al. (2008), este resultado pode estar associado ao fato das análises realizadas no presente trabalho tratarem de uma região do Brasil onde a deficiência hídrica não representa um fator limitante de grande magnitude, uma vez que, mesmo nas localidades a oeste do Estado de São Paulo – onde a deficiência hídrica é normalmente é mais elevada que nas demais partes do Estado –, a deficiência hídrica não inviabiliza a obtenção de níveis economicamente viáveis de produtividade da cana-de-açúcar.

Assim, pode-se supor que caso a mesma análise fosse expandida para levar em consideração regiões com maiores níveis de deficiência hídrica (como o Centro-Oeste e o Nordeste do Brasil), certamente este fator ganharia importância relativa em comparação aos demais.

A análise da importância relativa da temperatura mínima passa pela mesma linha de raciocínio utilizada na análise da deficiência hídrica, em que apesar do forte efeito da temperatura sobre o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, os índices de correlação obtidos foram muito baixos em comparação com as demais variáveis.

Isso, como já abordado, deve ser entendido mais como resultado da baixa variabilidade espacial da temperatura máxima e mínima no Estado de São Paulo na série analisada (já que os dados de entrada foram consolidados em médias decendiais) do que por um baixo efeito da variável sobre a produção de cana (Tabela 9 e Figuras 14 e 15). Novamente, supondo que a mesma análise fosse expandida para regiões onde a baixa temperatura fosse limitante da produtividade da cana-de-açúcar (como os Estados da região Sul do Brasil, por exemplo), poder-se-ia esperar por uma elevação

no nível de correlação obtido. Outro fato que vale mencionar é que, pela Tabela 9, a temperatura média do Estado de São Paulo é de 22,75ºC, valor esse que se encaixa na temperatura ótima que gira esta em 22 a 30ºC, sendo que nestas condições a cultura apresenta seu máximo desenvolvimento (BARBIERI; VILLA NOVA, 1977; DOOREMBOS; KASSAN, 1979; MAGALHÃES, 1987).

Na análise realizada, a precipitação foi uma das variáveis que apresentou menor correlação com a eficiência da produção agrícola, com índice de Pearson de 0,06. Apesar da água ter papel fundamental no desenvolvimento e produtividade da cultura da cana-de-açúcar, a distribuição mensal da precipitação talvez tivesse apresentado maior importância relativa em comparação com as demais variáveis (ALFONSI et al., 1987).

5.5 Relação entre o solo e a eficiência da produção agrícola

Como já apresentado anteriormente, o solo explicou cerca de 15% da variabilidade da eficiência da produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo (Figura 13) na média de todas as safras analisadas.

A Figura 16 apresenta a variação temporal dessa correlação ao longo do período, onde pode-se observar que a correlação entre eficiência de produção de cana-de-açúcar e aptidão agrícola dos solos variou entre 0,10 e 0,18.

Isso por sua vez, o que pode contrastar com o fato da aptidão agrícola dos solos não apresentar variação temporal, uma vez que foi derivada de um mapa de solos. Um aspecto importante na análise do componente pedologico é que, embora as características físicas e estruturais dos solos sejam supostamente estáveis ao longo do tempo, é que a fertilidade do solo pode variar fortemente de acordo com o manejo empregado na cultura que, por sua vez, é função da conjuntura econômica, dos preços dos insumos e da remuneração do produtor. É evidente que estes fatores sofrem grande variação entre as diferentes safras e isso pode influir de modo decisivo sobre a eficiência da produção agrícola.

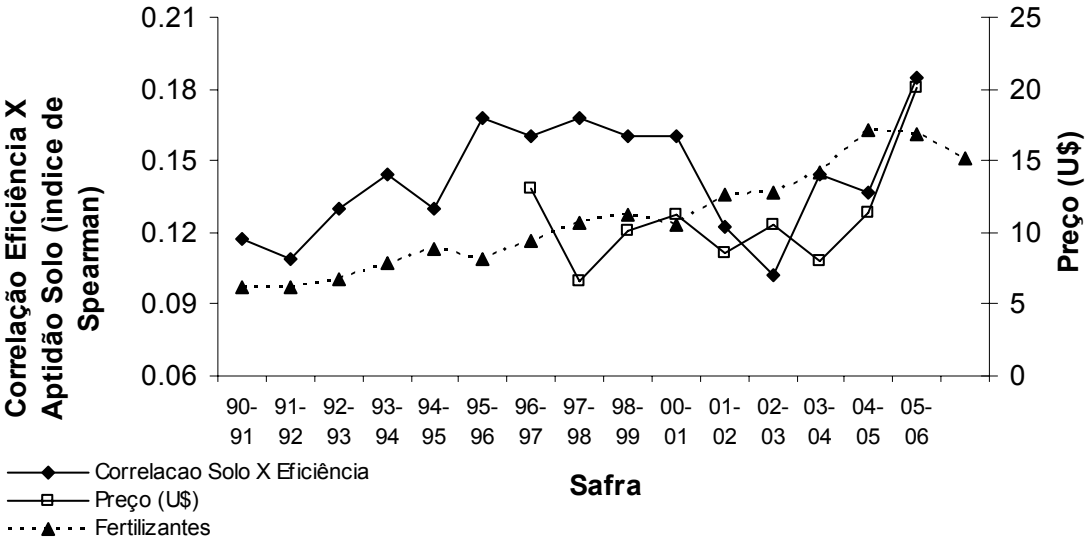

Figura 16 - Preços pagos em U$ pela saca de 50kg de açúcar, fertilizantes entregues ao consumidor final na Região Centro do Brasil (bilhões de toneladas) (FERREIRA; GONÇALVES, 2007) e a eficiência média de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

Assim, uma hipótese que surge na análise da variação temporal do índice de Spearman é que esta seja decorrente, principalmente, das diferentes estratégias de manejo do solo - representado principalmente pelo aspecto nutricional – adotadas pelo setor produtivo tendo em conta as perspectivas de preços pago pela cana, custo de produção e rentabilidade da atividade.

Por este ponto de vista, seria lógico supor que em anos com perspectiva de baixo rendimento da atividade agrícola, o fator solo ganhe importância nessa análise, uma vez que a quantidade de insumos utilizados para correção e adubação do solo tende a diminuir e as diferenças naturais de fertilidade entre os solos sejam realçadas. Com isso, a fertilidade natural dos solos não seria mascarada pela aplicação de insumos, elevando a correlação entre a eficiência de produção agrícola e a aptidão dos solos (MARIN et al., 2008).

Em contrapartida, em anos com melhores perspectivas de rendimento, a correção e adubação dos solos seria mais intensa, reduzindo as diferenças naturais dos solos em termos de fertilidade, o que atuaria no sentido de reduzir a correlação entre a eficiência de produção agrícola e a aptidão do solos (MARIN et al., 2008), uma vez que

os solos de menor fertilidade se aproximariam daqueles em melhores condições graças ao uso de insumos.

Ainda que se trate apenas de uma inferência, essa hipótese poderia ser testada comparando-se a variação do índice de Spearman com o uso de fertilizantes pelo setor sucroalcooleiro ao longo do período analisado. Como não foi possível encontrar na literatura ou nos bancos de dados disponíveis a quantidade de fertilizantes utilizados apenas pelo setor sucro-alcooleiro, utilizou-se os dados apresentados por Ferreira e Gonçalves (2007), tratando do consumo geral de fertilizantes na agricultura na região central do Brasil, no qual se insere o Estado de São Paulo.

Na Figura 16, observa-se a variação temporal das curvas de consumo de fertilizantes e do índice de Spearman, com indicação de fraca correlação entre elas. Aplicando a análise de regressão entre essas variáveis envolvendo toda a série de dados, obteve-se coeficiente de determinação (R^2) de apenas 5% (dados não apresentados), indicando fraca correlação entre esses fatores. No entanto, quando a mesma análise foi feita apenas para o período entre a safra 1990/1991 e 2000/2001, obteve-se R^2=0,59, com tendência geral de queda no índice de Spearman ao longo do período e crescimento na quantidade de fertilizantes, corroborando a hipótese acima descrita.

Para o período entre as safras 2002/2003 e 2005/2006, nota-se a elevação tanto do índice de Spearman como do consumo de fertilizantes, o que contradiz a hipótese inicial. Isso, contudo, pode estar associado à intensa expansão do cultivo de cana-de-açúcar para região oeste do Estado, ocupando solos relativamente menos férteis que o das áreas tradicionais e, portanto, elevando a importância relativa do componente solo na explicação da variabilidade da eficiência de produção de cana-de-açúcar. Neste sentido, admitindo que a idéia tratada neste capítulo esteja correta, pode-se aguardar pela queda na correlação entre solo e eficiência nos próximos anos, na medida em que essas novas áreas sejam cultivadas e a fertilidade natural desses solos seja paulatinamente melhorada ao longo do tempo.

5.6 Relação entre os fatores conjunturais e a eficiência da produção agrícola

Para melhor compreensão das relações entre fatores conjunturais na eficiência produtiva da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, é necessário tentar dissociá-lo dos fatores ambientais e, para isso, tem-se a equação fundamental deste trabalho:

$$Eficiência = \frac{\text{Pr}\,odutividade \quad Observada}{\text{Pr}\,odutividade \quad Atingível} \tag{16}$$

Quando há restrição ambiental (clima e/ou solo) séria, analisando-se de forma linear ao longo das safras no período de 1990 a 2006, deve se analisar o denominador e o numerador da equação fundamental (equação 16) em duas situações básicas. Na primeira, quando o denominador diminui, pode-se inferir que houve condições ambientais restritivas durante a safra. Neste sentido, observando-se a Figura 17b, pode-se notar que as oscilações decorrentes principalmente do clima são relativamente pequenas na média do Estado.

Na segunda situação, quando a produtividade observada (Figura 17a) oscila de modo independente da produtividade atingível, pode-se atribuir essa variação a fatores externos ao ambiente agrícola, com indícios de que fatores conjunturais podem ter influenciado tal variabilidade temporal. Dentre os fatores que compõem este aspecto conjuntural, pode-se citar elementos como o preço, tecnologias, investimentos e políticas publicas. Dentro desta perspectiva, faz-se um breve apanhado do contexto socioeconômico e histórico que envolveu o setor canavieiro ao longo do período analisado neste trabalho.

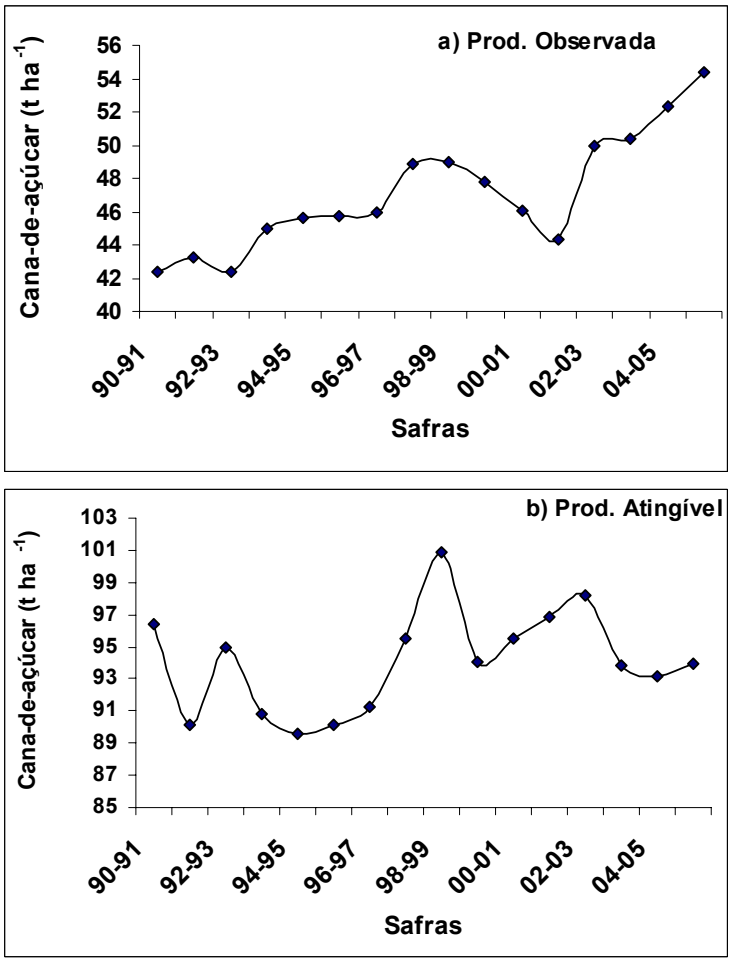

Figura 17 - Variação da Produtividade Observada e Estimada ao longo das safras de 1990/1991 a 2005/2006

Segundo Vian (2003), no inicio da década de 90, o complexo canavieiro do Brasil poderia ser caracterizado basicamente como produção agrícola e fabril sobre o controle dos usineiros, heterogeneidade produtiva (principalmente na industrialização da cana-de-açúcar), aproveitamento baixo dos subprodutos, competitividade baseada em baixos salários e na produção extensiva. Na escala da economia política, inicia-se um processo de desregulamentação, com a gradativa diminuição da intervenção estatal, para a inserção no livre mercado, causando significativas mudanças do setor sucroalcooleiro nacional que advém de um largo período de controle estatal.

O grande marco do início dos anos 90 é a extinção do Instituto do Açúcar e do Álcool criado desde 1933, sendo o principal órgão gestor do setor sucroalcooleiro, com as funções de administrar e propiciar o seu desenvolvimento e estabelecer quotas de produção e preço da cana, do açúcar e do álcool No ano de 1990, foi liberado o preço

do açúcar que conseqüentemente abriu o caminho para um novo processo, para o delineamento das atividades do setor sucroalcooleiro, sendo que o planejamento e a execução das atividades relativas à produção e a comercialização deixaram de ser orientadas pelo governo e passaram a fazer parte da administração privada.

Devido a este novo contexto de mercado, os agentes do setor passaram a atentar para os fatores que pudessem aumentar a sua competitividade frente aos concorrentes (MARJOTTA-MAISTRO, 1998), tornando-se imprescindível a conquista de clientes através da garantia de abastecimento de matéria prima e credibilidade em termos de padrão de qualidade, quantidade e prazo de entrega.

De acordo com a Figura 11a, o cenário no inicio dos anos 90 é de poucas áreas de alta eficiência (Figura 12), com a eficiência na média total do Estado de São Paulo de 0,42 (Tabela 5).

Na safra seguinte 1991/1992 (Figura 11b) este quadro melhora e a eficiência passa a 0,46, este fato pode ser explicado exatamente pela queda da produtividade atingível média geral do Estado de São Paulo de 96,4 t ha^{-1} para 90,2 t ha^{-1}, ou seja, restrições no ambiente físico contribuíram para a elevação da eficiência de produção agrícola, associado ao aumento médio de 1 t ha^{-1}na produção observada.

Nesta safra ocorreu a liberação do preço do açúcar, com aumento na competitividade no mercado devido à livre concorrência gerando investimentos e melhorias dos tratos culturais, e contribuindo para elevação da eficiência nas regiões tradicionais do Estado (Tabela 5, Figura 12d).

O aumento do valor da produtividade atingível (Figura 17b) para 95 t ha^{-1} e a queda da produtividade observada em quase 1 t ha^{-1} repercutiu diretamente na queda da eficiência média do Estado de São Paulo para 0,42, ou seja, ao valor de eficiência muito próximo do ano de 1990 (Figura 12c, Tabela 5).

Com o processo de desregulamentação ainda recente, o período que vai de 1993 a 2000 apresenta estabilidade relativa na eficiência média do Estado (Figura 12d, Tabela 5). A safra seguinte (Figura 11e e Tabela 5) mostra uma continuidade sem alteração na capacidade ambiental de gerar biomassa (Figura 16b) recebendo pouca alteração. No entanto, foi neste período em que teve fim o oligopólio da distribuição de combustíveis no Brasil, surgindo pequenas e médias empresas que a principio eram

organizadas pelo Sindicato das Distribuidoras Regionais de Combustíveis (MARJOTTA-MAISTRO, 1998). Da safra de 1994/1995 até a 1996/1997, a eficiência pouco se alterou, ficando praticamente constante nestes quase 4 anos, mantendo a eficiência média na faixa de 0,48 (Tabela 5).

Em 1996, vale mencionar, os preços da gasolina automotiva foram liberados ao consumidor, mas continuaram sob controle os preços de realização (remuneração da Petrobrás) e de faturamento da gasolina A (preço de venda às distribuidoras) e os preços do óleo diesel na bomba. Outro fato marcante em 1996 é o inicio a partir de maio da distribuição de combustível pelas distribuidoras independentes (MARJOTTA-MAISTRO, 1998).

Em 1997 (Figura 12g e Tabela 5), ocorre a liberação do preço do álcool anidro. A exportação brasileira da safra 1997/1998 foi cerca de 6,2 milhões de toneladas, com as usinas trabalharam no limite da capacidade de produção (ALVES, 1998) e isso refletiu no aumento da produtividade média do Estado de São Paulo de 3 t ha^{-1} e elevação da eficiência até a média geral de 0,49.

A Figura 18 apresenta as curvas de variação da eficiência de produção agrícola em conjunto com os dados de preço da saca de açúcar (obtidos apenas a partir da safra 1997/1998) e esse fator parece ter grande influência na determinação da eficiência.

Na safra 1998/1999 (Figura 11i e Tabela 5), a produção média de cana-de-açúcar no Estado continuou no mesmo patamar da safra anterior cujo crescimento marcou uma nova fase de produção e negociação da cana-de-açúcar, mesmo com uma grande queda no valor pago em 1999 (US$ 6,6/saca de 50 kg) (Figura 18), ou seja, praticamente a metade do valor da safra anterior. A produtividade atingível atingiu seu maior valor, com cerca de 101 t ha^{-1} (Figura 17b).

Ainda em 1998 foi estabelecido uma nova sistemática para o pagamento da cana, o sistema Consecana – Conselho dos produtores de cana-de-açúcar e álcool do Estado de São Paulo, que consiste em calcular o valor da tonelada de cana considerando os preços do produto gerado. Neste ano, o governo passou a efetuar compras de álcool pelo governo para compor estoque e proporção do álcool anidro na gasolina passa a ser 24% (MARJOTTA-MAISTRO, 1998).

No ano de 1999, ocorre a liberação do preço do álcool hidratado e o fortalecimento das grandes empresas responsáveis pela comercialização e produção de açúcar e álcool. Neste ano, o Brasil também ultrapassou os níveis de produção da Índia e da União Européia, com exportação de mais de 9 milhões de toneladas de açúcar.

Em termos nacionais, a produção brasileira atinge uma área de 300,393 milhões de toneladas de cana e 19 milhões de toneladas de açúcar na safra de 1999/2000. Na safra seguinte, o setor é marcado pela escassez de matéria prima para a moagem, resultado no aumento do consumo de etanol e da elevação dos preços do açúcar (Figura 18), explicando a forte elevação na produção do Estado de São Paulo nas safras seguintes.

A partir desta safra, a demanda interna por etanol aumenta progressivamente, com o licenciamento de 6,95 milhões de veículos bi-combustíveis entre 2003 a dezembro de 2008, segundo a (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRIVANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES NO BRASIL - ANFAVEA, 2008).

A partir de 2004 (Figura 17a), a produção observada média do Estado de São Paulo atinge o patamar de 50 t ha^{-1}, mostrando uma maior distribuição espacial e a incorporação de novas áreas que passam a ter alta eficiência (Figuras 8e, 8f, 8g e 8h) uma distribuição enquanto que a produtividade atingível fica na faixa das 93 t ha^{-1},(Figura 15b) sendo assim a eficiência atinge a faixa dos 0,52 nas safras 2003/2004, 0,56 em 2004/2005 e 0,57 em 2005/2006 (Tabela 5 e Figura 10).

Em relação aos preços pagos pela cana-de-açúcar, na safra de 2004/2005 o valor da saca atinge US$ 11,3, já na safra de 2005/2006 este valor explode para US$ 20 (Figura 18 e Tabela 11). Alguns fatores contribuíram para este bom cenário da produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, entre eles, o consumo crescente do etanol e as perspectivas de torná-lo uma *commoditie* mundial, atraindo grande montante investimentos para a construção de usinas no Brasil.

Não só o setor canavieiro se tornou rentável e promissor, mas regiões tradicionais voltaram seus investimentos, além do próprio front da cana-de-açúcar expandir-se das consolidadas áreas tradicionais e anexar boa parte do oeste paulista aumentando os espaços produtivos e a própria inserção e consolidação desta cultura já com bom patamares de eficiência e rendimento (Figuras 11m, 1n, 11o e 11p).

Com uma configuração muito diferente dos anos 90 (comparar Figura 12a, Figura 12d e Figura 10), a partir da safra de 2002/2003, pode se dizer que a eficiência e a produção de cana-de-açúcar deu (Figura 17a) um grande salto culminando em um outro padrão de produção e uma nova realidade de mercado. Esta condição é também resultado da tradição canavieira paulista, pois esta aliada a um ambiente que além de climaticamente favorável de poucas restrições, alia-se a correção de solos e investimentos numa região já bem estruturada, com boa estrutura logística, e com diversos centros de pesquisa científica, dando suporte ao avanço do setor no Estado.

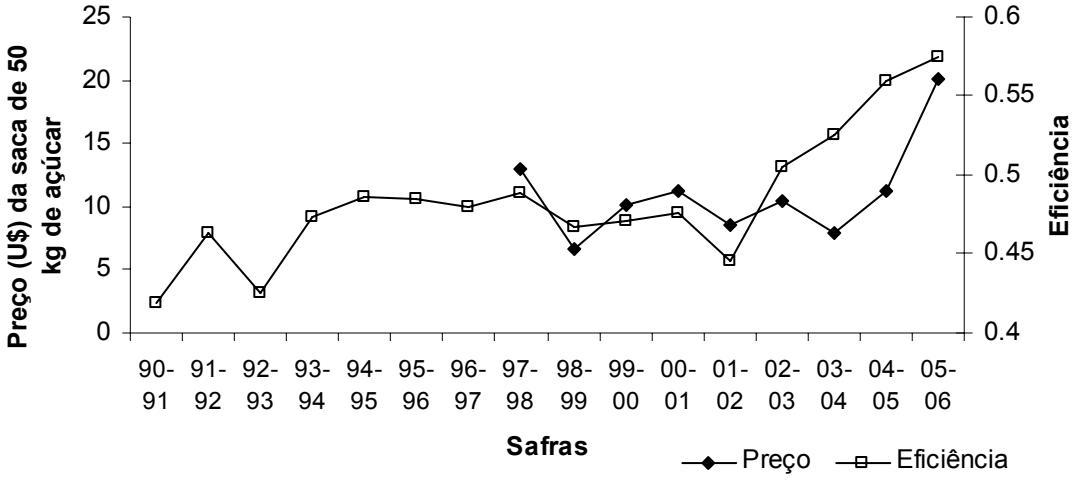

Figura 18 - Preços pagos pela saca de 50kg de açúcar (em US$) e a eficiência média de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

6 CONCLUSÕES

A eficiência de produção agrícola de cana-de-açúcar aumentou ao longo do período de 1990 a 2006, saindo de 0,42 para 0,58, com aumento expressivo principalmente nas áreas de cultivo com eficiência acima de 80%, indicando intensificação no processo produtivo ao longo do período analisado.

O modelo das Zonas Agroecológicas FAO-33 foi calibrado, obtendo-se índice de determinação (R^2) de 0,60 em comparação com os dados de campo. No procedimento de validação, obteve-se R^2 = 0,67, com tendência de estimativa de 6%.

A principal variável abiótica a explicar a variabilidade da eficiência de produção agrícola foi a radiação solar global, com índice de correlação de 16%. O clima, de modo geral, explicou 43% da eficiência produtiva de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, representado pelo somatório das correlações dos seguintes elementos: radiação solar, deficiência hídrica, temperatura máxima, precipitação e temperatura mínima.

O solo explicou, em media, 15% da variabilidade da eficiência de produção de cana-de-açúcar no Estado, indicando a existência de dois padrões de correlação entre essas variáveis: o primeiro no período que vai de 1990 a 2001 e o segundo de 2002 até 2006. Somando-se ao solo a importância relativa dos elementos climáticos, observou-se que os fatores abióticos explicaram 58% da variabilidade da eficiência no período analisado.

Em média, 42% da variabilidade da eficiência da produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo foi explicada por outros fatores, além do clima e do solo, inferindo-se que os preços pagos pelo açúcar e a demanda interna pelo etanol parecem exercer papel de maior importância.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, M.G. **Características da informação geográfica em formato digital, conceitos e técnicas para a re-utilização eficaz dos dados**. Estoril: Comunicação ao 2º ESIG, 1998a. 10 p.

_____. **Sistemas de Informações geográficas:** conceitos. Estoril: Revista Esig, 1998b. 60 p.

ACOCK, B.; ACOCK, M. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agronomy Journal,** Madison, v. 83, p. 56-61, 1991.

ALFONSI, R.R.; PEDRO JR., M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, U. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar:** cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42-55.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Irrigation and drainage.** Rome: FAO, 1998. 22 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALMEIDA, C.F.P.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J. **Estimativa da distribuição espacial de retenção de água em um solo utilizando krigagem indicaria.** Curitiba: UFPR, Departamento de Estatística, 1996. 37 p.

ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C. e; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agrícola,** Piracicaba, v. 57, p. 653–659, 2000.

ARANHA, C.; YAHN, C.A. Botânica da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar**: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill: 1987. v. 1, p. 3-18.

ARAUJO, M.I.M. **Zoneamento da produtividade potencial climática da cana-deaçúcar no Estado do Rio de Janeiro.** Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

ARGENTON, P.E. **Influência das variáveis edafoclimáticas e de manejamento no rendimento de variedades de cana-de-açúcar *(Saccharum sp),* na região de Piracicaba**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRIVANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES NO BRASIL. **Carta Anfavea, 2008.** Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/carta.html>. Acesso em: 15 mar. 2009.

BACCHI, O.O.S.; SOUZA, J.A.G.C. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. In: CONGRESS OF THE SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 1., 1978, London. **Proceedings...** London: ISSCT, 1978. v. 2, p. 1733-1741.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico na cana-de-açúcar (*Saccharum spp).*** 1981. 82 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentos) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.

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

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: PLANALSUCAR, 1977. 22 p.

BARBIERI, V.; TUON, R. L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas.** Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1992. 17 p.

BARNES, A.C. **The sugarcane**. 2nd ed. London: Hill Books, 1974. 572 p.

BELTRAME, J.A. Novas variedades comerciais para a região centro-sul. In; SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2005, Piracicaba. Disponível em: <http://www.ppi-far.org/ppiweb/pbrazil.nsf/926048f0196c9d4285256983005c64de/d03bb114794bf3a9032570d8004b8018/$FILE/Anais%20Joao%20Americo%20Beltrame.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2009.

BERDING, N.; HURNEY, A.P.; SALTER, B.; BONNETT, G.D. Agronomic impact of sucker development in sugarcane under different environmental conditions. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 92, n. 1, p.203-217, 2005.

BOOTE, K.J., JONES, J.W., MISHOE, J.W., WILKERSON G.G.Modeling growth and yield of groundnut. In: AGROMETEOROLOGY OF GROUNDNUT INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1985, Niamey. **Proceedings…** Niamey: ICRISAT, 1985. 26 p.

BORDEN, R.J. Nitrogen effects upon the yield and composition of sugarcane. **Hawaiian Planters Record,** Honolulu, v. 52, p. 1–51, 1948.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Aptidão agrícola das terras de São Paulo**. Brasília: BINAGRI, 1979. 111p. (Estudos Básicos para o Planejamento Agrícola. Aptidão Agrícola das Terras, 20).

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário da Agricultura Brasileira**: 2005. Brasília, 2005. Disponível: http://www.agricultura.gov.br/portal/page?_pageid=33,2789141&_dad=portal&_schema=PORTAL. Acesso em: 15 jul. 2008.

BRAY, S.C. **A cultura da cana-de-açúcar no Vale do Paranapanema**. 1980. 170 p. Tese (Doutorado em História) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

BRETT, P.G.C. Flowering and pollen fertility in relation to sugarcane breeding in Natal. In: INTERNATIONAL SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 7., 1951, Natal**. Proceedings…** Natal: ISSCT, 1951. p. 43-46.

BULL, T.A.; GLASZIOU, K.T. Sugarcane. In: EVANS, L.T. (Ed.). **Crop physiology some case histories.** Cambridge: Cambridge University Press, 1975. p. 51-72.

BULL, T.A.; TOVEY, D.A. Aspects of modeling sugarcane grouth by computer simulation. In: INTERNATIONAL SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 15., 1974, Durban. **Proceedings…** Durban: ISSCT, 1974. p. 1021–1032.

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

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. Princípios básicos do geoprocessamento. In: ASSAD, E.; SANO, E. (Org.). **Sistema de Informações Geográficas:** aplicações na agricultura. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, CPAC, 1998. p. 3-12.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, A.P.; MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; PICINI, A.G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An introduction to environmental biophysics**. 2nd ed. London: Springer, 1998. 186 p.

CAMPOS, T.; CANÉCHIO, V. **Principais culturas**. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. p. 305–351.

CANABRAVA, A.P. **História econômica: estudos e pesquisas**. São Paulo: UNESP, 2005. 320p.

CARDOSO, F. **Queima de cana antes da colheita**. Disponível em: <http://www.jornalcana.com.br>. Acesso em: 24 mar. 2008.

CARVALHO, E.P. Formulação de uma estratégia para garantir o aumento da produção. In: SEMINÁRIO “UMA ESTRATÉGIA PARA O ETANOL BRASILEIRO”, 2006, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Casa do Brasil, 2006. 8 p.

CHEEROO-NAYAMUTH, F.C.; ROBERTSON, M.J.; WEGENER, M.K.; NAYAMUTH, A.R.H. Using a simulation model to assess potential and attainable yield in Mauritius. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 66, p. 225-243, 2000.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/cana.pdf. Acesso em: 29 maio 2008

CONCEIÇÃO, M.A.F.; MARIN, F.R. Avaliação de modelos para a estimativa de valores diários de radiação solar global com base na temperatura do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** Santa Maria, v. 15, n. 1, p.103-108, 2007.

COWEN, D. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences? **Photogrammetric Engineering and Remoting Sensing,** London, v. 13, n. 15, p. 1551-1555, 1988.

DAS, U.K. Nitrogen nutrition of sugar cane. **Plant Physiology,** Dallas v. 11, p. 251–317, 1936.

DE WIT, C.T. **Photosyntesis of leaf canopies**. London: Wageningen Pudoc, 1965. 57 p. (Agricultural Research Report, 663).

DELGADO DELGADO ROJAS, J.S.D. **Modelo agrometeorológico para estimativa dos efeitos de deficiência hídrica na produtividade agro-industrial da cana-de-açúcar**. 1998. 74 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIECONÔMICOS. Desempenho do setor sucroalcooleiro brasileiro e os trabalhadores. **Estudos e Pesquisa,** Brasília, v. 3, n. 30, 38 p. 2007.

DMB. **Máquinas e implementos** <http://www.dmb.com.br/Catalogo/Default.asp?Cat_ID=1>. Acesso em: 20 fev. 2008

DOOREMBOS, J.; KASSAN, A.H. **Efeitos da água no rendimento das culturas.** Roma: FAO, 1994. 212 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D.A. ; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A. ; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. esp., p. 46-50, 1998.

EMBRAPA INFORMÁTICA AGROPECUÁRIA. **Agritempo:** sistema de monitoramento agrometeorológico. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; Cepagri/Unicamp, 2002. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br>. Acesso em: 23 jun. 2008.

FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. ***La canne à sucre.*** Barcelona: Editions Maisonneuve et Larose, 1970. 57 p. (Collection "Techniques Agricoles et Productions Tropicales").

_____. **La canã de azucar**. Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

FERRARIS, R., CHAPMAN, L.S. The dynamics of bud development in ratooning stubble of sugar cane varieties. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists,** Bangkok, v. 1 p. 164-171, 1991.

FERREIRA, M. Tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários em cana-de-açúcar In: SEGATO, S.V. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 293-303.

FERREIRA, R.; GONÇALVES, J.S. Evolução e sazonalidade do consumo de fertilizantes no Brasil e nas unidades da federação no período 1987-2005. **Informações Econômicas,** São Paulo, v. 37, n. 11, p. 8-14, 2007.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Análise do mercado de terras:** relatório bimestral. São Paulo, 2009. 56 p.

FORRESTER, J.W. **Industrial dynamics**. Waltham: Pegasus Communications, 1961.

GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEREIRA, A.B.; VILA NOVA, N.A. Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Scientia Agricola,** Piracicaba, v. 54, n. 1/2, p. 62-68, 1997.

GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. **Crop - water relations**. New York: John Wiley, 1983.547 p.

GLASZIOU, K.T; BULL, T.A; HATCH, M.D.; WHITEMAN, P.C. Phisiology of sugarcane. VII. Effects of temperature, photoperiod, and diurnal and season and season temperature changes on growth and ripening. **Australian Journal of Biological Sciense,** Melbourne, v. 18, p. 53-66, 1965.

GLOVER, J. Practical theoretical assessments of sugarcane potential yeld in Natal. **Proceeding of South Africa Techinologists Association,** Natal, v. 46, p. 138–141, 1972.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, Washington, v. 315, p. 808-810, 2007.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

GOUVÊA, J.R.F. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos da cultura de cana-de-açúcar na região de Piracicaba – SP.** 2008. 99 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

HILDEU, F.A. **Relações entre a radiação fotossintéticamente ativa e a radiação global em Piracicaba SP**. 1994. 41 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

HUBERT, R.P. **The growning of sugar cane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. 719 p.

INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar va. 290, em solo tipo terra-roxa legítima. **Bragantia,** Campinas, v. 16, p. 1-13, 1957.

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

_____. Temperature and season effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 36, p. 41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N.G.; De JAGER, J.M. Effect of water stress on growth, leaf resistance and canopy temperature infield grown sugarcane. In: ANNUAL CONGRESS OF THE SOUTH AFRICAN SUGAR TECHNOLOGISTS ASSOCIATION, 60., 1986, Mount Edgecombe. **Proceedings…** Amsterdam,1986a. p. 156-161.

_____. The reaction of two varieties of sugarcane to water stress. **Field Crops Research,** Amsterdam, v.14, p. 15-28, 1986b.

INMAN-BAMBER, N.G.; MCGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 83, p. 41–51, 2003.

INOUE, N.; SONOBE, S.; NAGATA, Y.; SHIMMEN, T. Secretion of lectin-binding material in rhizoid differentiation of *Spirogyra*. **Plant Cell Physiology,** London, v. 1, p. 973–977, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal**. 2002. Disponível:<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2002/ default.shtm>. Accesso em: 30 Jun. 2008.

JAMES, G. Introduction to sugarcane. In: JAMES, G. **Sugarcane.** Oxford: Wiley-Blackwell, 2003. p. 1-19.

JENSEN, M.E. **Water consumptions by agricultural plant growth**. New York: Academic, 1968. v. 2, 22 p.

JONES, C.A. DSSAT cropping system model. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 18, p. 235-265, 2003.

JONES, C.A.; KINIRY, J.R. **CERES-maize**: a simulation model of maize growth and development. Dallas: Texas A&M University Press, 1986. 134 p.

JONES J.W.; LUYTEN, J.C Simulation of biological processes. In: PEART, R.M.; CURRY R.B. **Agricultural systems modeling and simulation.** Gainesville: Marcell Dekker, 1998. 335 p.

KEATING, B.A.; HUTH, N. APSIM: a framework for modeling sugarcane production systems. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modeling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints.** St. Lucia: University of Queensland, 1994. p. 71-79.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modeling sugarcane production systems. I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

KEATING, B.A.; VERBURG, K.; HUTH, N.I.; ROBERTSON, M.J. Nitrogen management in intensive agriculture: sugarcane in Australia. In: KEATING, B.A.; WILSON, J.R. (Ed.). **Intensive sugarcane production:** meeting the challenges beyond 2000. Wallingford: CAB International, 1997. p. 221-242.

KEATING, B.A.; LIU, D.L.; INMAN - BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; KINGSTON, G. Comparison of levels of approach in modelling sugarcane potential yield. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modeling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints.** St. Lucia: University of Queensland, 1994. p. 43-51.

KOFFLER, N.F.; DONZELI, P.L. Avaliação dos solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Ed.). **Cana-de-açúcar**: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 19-41.

KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa,** Johannesburg, v. 2, n. 6, p. 119–139, 1959.

LAMPARELLI, R.A.C.; ROCHA, J.V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão**: fundamentos e aplicações. Guaíba: Revista Agropecuária, 2001. 118 p.

LENOBLE, J. **Atmospheric radiative transfer.** Hampton: A Dee-Park Publ., 1993. 367 p.

LISSON, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 92, p. 321-335, 2005.

LIU, D.L.; BULL, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process – based model. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 144, p. 181-211, 2001.

LIU, D.L.; SCOTT, B.J. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 106, p. 41-59, 2001.

MACEDO, I.C. **A energia da cana-de-açúcar**: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. 2. ed. São Paulo: Única, 2007a. 231 p.

_____. Situação atual e perspectivas do etanol. **Estudos Avançados,** São Paulo, v. 21, n. 59, p. 157-165, 2007b.

MACHADO, E.C. Fisiologia da produção da cana-de-açúcar: crescimento. In: PARANHOS. S.B. **Cana-de-açúcar:** cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargil, 1987. v. 1, p. 56–87.

MARIN, F.R. **O clima e a eficiência da produção agrícola no Estado de São Paulo,** CBAgro, 2005. 2 p.

MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; UNGARO, M.R.G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo**. Scientia Agricola,** Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 1-6, 2000.

MARIN, F.R.; LOPES-ASSAD, M.L.; ASSAD, E.D. ; VIAN, C.E.; SANTOS, M.C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 43, p. 1449-1455, 2008.

MARIN, F.R.; PANDORFI, H.; SENTELHAS, P.C.; CAMARGO, M.B.P.; HERNANDEZ, F.B.T. Perda de produtividade potencial da cultura do sorgo no Estado de São Paulo. **Bragantia,** Campinas, v. 65, n. 1, p. 157-162, 2006.

MARJOTTA-MAISTRO, M.C. **Ajustes no mercado de álcool e gasolina no processo de desregulamentação.** 2002. 180 p. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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 Transaction of the Royal Society of London,** London, v. B281, p. 277-294, 1977.

MUCHOW, R.C.; SPILLMAN, M.F.; WOOD, A.W.; THOMAS, M.R. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 45, p. 37-49, 1994.

NEFATIM. **Cana-de-açúcar.** Disponível em: <http://www.sugarcanecrops.com/p/foreword/>. Acesso em: 20 fev. 2008

NICKELL, L.G. Sugarcane. In: ALVIM, P.; KOZLOWSKI, T. (Ed.). **Ecophysiology of tropical crops.** New York: Academic Press, 1977. p. 89–110.

O'LEARY, G.J: A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 68, p. 97–111, 2000,

OMETTO, J.C. **Uma equação para a estimativa de evapotranspiração potencial: sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP.** 1974. 129 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1974.

_____. **Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar.** Piracicaba: ESALQ, 1980. 17 p.

_____. **Bioclimatologia vegetal.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425 p.

ORTOLANI, A. A.; SENTELHAS, P. C.; CAMARGO, M.B.P. Modelos agrometeorológicos para estimativa da produção anual e sazonal de látex em seringueira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** Santa Maria, v. 4 n. 1, p. 147–150, 1996.

PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar:** cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargil, 1987. v. 1, 431 p.

PEREIRA, A.R. **Previsão do florescimento em cana-de-açúcar.** Piracicaba: Comunidade de Pesquisa Agropecuária, 1985. 32 p.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. Um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia,** Campinas, v. 45, n. 1, p. 107-122, 1986.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia:** fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PODESTÁ, G.P.; NÚÑEZ, L.; VILLANUEVA, C.A.; SKANSI, M.A. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 123, p. 41-53, 2004.

PRADO, H. Ambientes de produção da cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil. **Informações Agronômicas**, Ribeirão Preto, n. 110, 2005. 6 p.

RAMOS, I.C.; LOPES-ASSAD, M.L.C.; MARIN, F.R. **Aptidão das terras do Estado de São Paulo para cana-de-açúcar:** relatório. São Carlos: UFSCar, 2007. 21 p.

RICHARDSON, C.W.; WRIGHT, D.A. **WGEN:** a model for generating daily weather variables. Washington: USDA, Agriculture Research Service, 1984. 83 p. (ARS, 8).

RITCHIE, R. Description and performance of CERES-wheat: a user-oriented wheat yield model. In: ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Agriculture Research Service. **ARS wheat yield project.** ARS-38. Springfield: National Technical Information Service, 1985. p. 159-175.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu**:** UNESP, Instituto de Biociências. 1995. 99 p. Disponível em: http://www.residenciaagronomica.ufpr.br/bibliografia/MATURAD.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2008.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilha no ambiente Excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 133-137, 1998.

ROSTRON, H. Chemical ripening of sugarcane with ethrel and polaris. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 15., 1974, Natal. **Proceedings...** Natal: ISSCT,1974. p. 953-965.

SALIENDRA, N.Z.; MEINZER, F.C. Relationship between root/soil hydraulic properties and stomatal behaviour in sugarcane. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 16, p. 241–250, 1989.

SALVIANO, A.A.C. **Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba-SP**. 1996. 91 p. Piracicaba: Tese (Doutorado em Ciência Animal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1996.

SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R.; SPAROVEK, G. Dependência espacial dos teores de macronutrientes da parte aérea da *Crotalária juncea* em área de erosão acelerada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Lavras, v. 25, p. 115-122, 1995.

SCARPARI, M.S. **Modelos de previsão para a produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp)* através de parâmetros climáticos.** 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

_____. **PREDPOL: um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado.** 2007. 120 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola,** Piracicaba, v.61, n. 5, p. 486–491, 2004b.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.;NÓBREGA, J.C.N. (Org.). **Atualizacão em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: CP 2, 2006. 415 p.

SENTELHAS, P.; FARIA, R.T.; CHAVES, M.O.; HOOGEMBOON, 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.

SIGH, B.N.; LAL, K.N. Investigation on the effect of age on the assimilation of leaves. **Annals of Botany,** Oxford, v. 49, p 291–307, 1935.

SILVA, A.P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. 2007. 120 p.Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

SILVA JÚNIOR, M.C. **Composição florística, estrutura e parâmetros fitossociológicos do cerrado e sua relação com o solo na Estação Florestal de Experimentação de Paraopeba**. 1984. 130 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.

SILVEIRA JR., P.; MACHADO, A.A.; ZONTA, E.P.; SILVA, J.B. de. **Curso de estatística I.** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, Editora Universitária, 1989. 135 p.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the CANEGRO sugarcane model. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 78, p. 151–164, 2002.

SINGELS, A.K.; DONALDSON; S. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 92, p. 291–303, 2005.

SMITH, D.M. **Growth and function of the sugarcane root system**. Amsterdam: Elsevier 2005. 35 p.

SNEDECOR, G.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 7th ed. Ames: Iowa State University Press, 1982. 507 p.

STANFORD, G.; AYRES, A.S. The internal nitrogen requirement of sugarcane. **Soil Science,** Philadelphia, v. 96, p. 338–344, 1964.

STEVENSON, G.C. **Genetics and breeding of sugarcane**. London: Longman, Green, 1965. 232 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 3rd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. 690 p.

THOMPSON, W. The city as a distorted price system. In: HOCHMAN, H.M. (Ed.). **The urban economy.** New York: Norton & Company, 1976. 425 p.

THORNLEY J.H.M. **Mathematical models in plant physiology**. London: Academic Press, 1976. 318 p.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance.** New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.104 p.

VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371 p.

VIAN, C.E.F. **Agroindústria canavieira:** estratégia competitiva e modernização. São Paulo: Ed. Átomo, 2003. 216 p.

WIEDENFELD, R.P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 43, p. 173-182, 2000.

WILKERSON, G.G. Modeling soybean growth for crop management, **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, p. 63-73, 1983.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo