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

**Modelagem agrometeorológica como base para a definição de
ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no
Estado de São Paulo**

Leonardo Amaral Monteiro

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

**Piracicaba
2012**

Leonardo Amaral Monteiro
Engenheiro Agrônomo

**Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de
produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

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

Piracicaba
2012

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

Monteiro, Leonardo Amaral

Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo / Leonardo Amaral Monteiro. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2012.
116 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Agrometeorologia 2. Balanço hídrico 3. Cana-de-açúcar 4. Clima - Eficiência
5. Sistema de Informação Geográfica I. Título

CDD 633.61
M775m

DEDICATÓRIA

*AOS MEUS PAIS E MEU IRMÃO GABRIEL, QUE SEMPRE ME APOIARAM, ATÉ A
MINHA CHEGADA NESSA ETAPA DA MINHA VIDA.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, que sempre esteve e sempre estará me apoiando e me dando força nas minhas decisões.

À minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida;

Ao Professor Dr. Paulo Cesar Sentelhas, pelo incansável apoio, amizade e confiança construídas desde que vim para Piracicaba.

À Angélica Jaconi, por todos os momentos que tive de felicidade, por ela proporcionados, e pela paciência nos momentos difíceis.

À Universidade de São Paulo, especialmente à ESALQ, por oferecer a oportunidade de realização deste mestrado.

Aos professores Paulo Cesar Sentelhas, Luiz Roberto Angelocci, Nilson Augusto Villa Nova, Sonia Maria de Stéfano Piedade, Quirijn de Jong van Lier, Sérgio Oliveira Moraes e Fábio Ricardo Marin, pelos ensinamentos repassados, e aos funcionários Ângela Márcia Derigi Silva e Luiz Fernando Novelo pelo apoio administrativo.

Aos colegas da pós-graduação, principalmente aos integrantes da Cúpula, pelos momentos de descontração e histórias no horário do cafezinho.

À República Alambique, por me acolher de maneira incondicional logo que cheguei a Piracicaba.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE SÍMBOLOS.....	16
1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar	19
2.2 A cana-de-açúcar no Brasil	21
2.3 Exigências climáticas da cultura da cana-de-açúcar.....	22
2.3.1 Radiação Solar.....	22
2.3.2 Temperatura.....	23
2.3.3 Exigências hídricas da cana-de-açúcar.....	24
2.4 Uso de modelos de simulação na agricultura.....	26
2.4.1 Modelos agrometeorológicos e simuladores utilizados para a cultura da cana-de-açúcar	28
2.4.2 Modelo da Zona Agroecológica (Modelo FAO)	30
2.5 Eficiência climática e eficiência agrícola da cana-de-açúcar.....	31
2.6 Solos e ambientes de produção para a cana-de-açúcar	32
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1 Obtenção e processamento dos dados meteorológicos.....	35
3.2 Balanço hídrico climatológico	38
3.3 Processamento dos dados geográficos para a elaboração dos mapas	40
3.4 Simulação dos ciclos e das épocas de plantio da cana-de-açúcar	42
3.5 Estimativa da produtividade potencial (PP) e da produtividade atingível (PA) da cana-de-açúcar	43
3.5.1 Estimativa da produtividade potencial (PP) da cultura da cana-de-açúcar	44
3.5.2 Estimativa da produtividade atingível (PA) da cultura da cana-de-açúcar	47
3.5.3 Fator de penalização da produtividade potencial e produtividade atingível pela ocorrência de baixas temperaturas: estresse pelo frio	49
3.6 Estimativa da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar.....	50

3.7 Mapeamento da produtividade potencial, produtividade atingível e da eficiência climática.....	51
3.8 Confeção dos mapas finais das variáveis climáticas, componentes do balanço hídrico, produtividade potencial e atingível	53
3.9 Análise do desempenho do modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade atingível da cana-de-açúcar	54
3.10 Análise e distribuições de frequências da produtividade atingível dos principais municípios canavieiros do Estado de São Paulo	56
3.11 Enfoque climático para a classificação dos ambientes de produção da cana-de-açúcar	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Variáveis meteorológicas e componentes do balanço hídrico climatológico.....	59
4.2 Produtividade Potencial e Produtividade atingível	68
4.2.1 Produtividade Potencial	68
4.2.2 Produtividade Atingível	77
4.3 Mapeamento da eficiência climática (η) e desempenho do modelo agrometeorológico para a estimativa de produtividade da cana-de-açúcar.....	85
4.3.1 Mapeamento da eficiência climática (η).....	85
4.3.2 Desempenho do modelo agrometeorológico de produtividade da cana-de-açúcar	92
4.4 Distribuições de frequência da produtividade atingível das principais regiões canavieiras do Estado de São Paulo	98
4.5 Classificação dos ambientes de produção sob dois enfoques climáticos: produtividade atingível (PA) e eficiência climática (η).....	103
4.6 Estudos de casos.....	104
5 CONCLUSÕES.....	107
REFERÊNCIAS	108

RESUMO

Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande expressão em vários estados brasileiros. Para que a mesma apresente bons níveis de produtividade, quer seja nas áreas tradicionais de cultivo ou nas áreas em expansão, é de extrema importância que haja a seleção e alocação das diferentes variedades de acordo com os ambientes de produção, os quais envolvem aspectos relacionados à qualidade dos solos e aos níveis esperados de produtividade em função disso. Apesar da importância do ambiente de produção para o manejo varietal e operacional do canavial, este não considera aspectos relacionados ao clima dos locais de cultivo. Sendo assim, o presente estudo buscou desenvolver um procedimento para a obtenção de classes de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar sob o enfoque climático, por meio do uso de modelos agrometeorológicos de estimativa das produtividades potencial e atingível, e da eficiência climática resultante dessas. A partir da utilização do modelo da Zona Agroecológica (modelo FAO), associado à penalização da produtividade pelo déficit hídrico, foi calculada a produtividade potencial e a produtividade atingível da cultura da cana-de-açúcar em 178 localidades do estado de São Paulo. Por meio do quociente entre essas produtividades, estimou-se a eficiência climática (η). Tanto as variáveis climáticas como as produtividades foram espacializadas por meio da técnica de regressão em que foram utilizadas coordenadas geográficas integradas. Foi calculado o balanço hídrico climatológico normal, na escala mensal, para a caracterização climática do Estado, e o balanço hídrico seqüencial, na escala decendial, para a penalização da produtividade potencial pelo déficit hídrico e obtenção da produtividade atingível. O balanço hídrico foi determinado de acordo com o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955) e a evapotranspiração de referência foi calculada utilizando-se a equação de Priestley e Taylor (1972). Essas simulações foram realizadas considerando-se períodos de 30 anos de dados, de 1973 a 2003, disponibilizados pelo SIGRH/DAEE-SP. Foram consideradas cinco épocas de plantio para a cana planta (fevereiro, março, julho, setembro e outubro) e três ciclos de maturação para a cana-soca (precoce, média e tardia). Foi inserido no modelo agrometeorológico empregado um fator de penalização das produtividades potencial e atingível pela ocorrência de baixas temperaturas do ar. De acordo com os mapas, foi possível propor uma classificação dos ambientes com base na produtividade atingível, a qual variou de 50 até 100 t ha⁻¹ e com base nos valores obtidos de eficiência climática, que variaram de 0,35 a 0,65. Conclui-se com isso, que o modelo agrometeorológico apresentou desempenho satisfatório, possibilitando juntamente com o emprego de um sistema de informações geográficas, a obtenção das classes climáticas dos ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar, que poderão subsidiar o planejamento das usinas quanto aos manejos varietal e operacional dos canaviais.

Palavras-chave: Eficiência climática; Deficiência hídrica; Produtividade potencial; Produtividade atingível; Sistema de informação geográfica

ABSTRACT

Agrometeorological modeling as the basis for sugarcane crop production environments definition in the state of São Paulo, Brazil

Sugarcane is a crop of great expression in several Brazilian states. For obtaining success, with high yield levels, in both traditional and expanding areas, it is very important that the selection and allocation of different varieties be done according to the production environments, which normally involve aspects related to the soil quality and the expected yield levels associated to that. Even considering the importance of the production environment concept for the varietal and operational management in the sugarcane mills, it does not consider aspects related to the climate conditions of the production areas. Based on that, the present study aimed to develop a procedure for obtaining the classification of the sugarcane production environments according to the climatic conditions, by the use of agrometeorological models for estimating potential (PP) and attainable (PA) yields, and the resulting climatic efficiency (η). This study used the association of the FAO Agro-ecological Zone model and the water deficit depletion model respectively for estimating PP and PA for sugarcane crop in 178 locations in the state of São Paulo. The η was calculated by the ratio between PA and PP. All the variables related to the climate and to the yield were spacialized by the multiple linear regression technique, which uses the geographic coordinates, altitude and their integration as independent variables. The monthly normal water balance was used to characterize the climate and the water availability conditions of the state, while the 10-day serial water balance was used to characterize the water deficit during the crop cycle for each year of the historical series. The water balance was determined by the Thornthwaite and Mather (1955) method and the reference evapotranspiration was estimated by the Priestley and Taylor (1972) equation. The sugarcane crop yield were simulated for a 31-year period, from 1973 to 2003, with data obtained from SIGRH/DAEE-SP. For such simulations five planting dates were considered for plant crop (February, March, July, September and October) and three cycles of maturation for ratoon crop (early, medium and late). A low temperature depletion factor was introduced in the yield models for considering the negative effect of frosts on sugarcane crop. According to the maps generated, it was possible to propose a production environment classification based on PA, which ranged from 50 to 100 t ha⁻¹, and also based on η , which varied between 0.35 and 0.65. These data when applied to a geographical information system (GIS) allowed to classify the production environments not only by using soil data but also using the classes defined by the climatic conditions, giving subsidies for the crop planning, variety management and operational activities.

Keywords: Climatic efficiency; Water deficit; Potential yield; Attainable yield; Geographical information system

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Estádios fenológicos da cana-de-açúcar e suas respectivas durações, em dias, do ciclo. Os valores do ciclo da direita se referem à cana-planta e os da esquerda à cana-soca. Fonte: Boletim da FAO nº 33, 1979 20
- Figura 2 - Localização geográfica dos postos de coleta de dados pluviométricos ... 36
- Figura 3 - Representação esquemática do procedimento de álgebra de mapas para a obtenção dos mapas finais dos atributos do clima, do balanço hídrico e das produtividades potencial e atingível da cana-de-açúcar, para o estado de São Paulo 54
- Figura 4 - Ambientes de produção de cana-de-açúcar para o Centro-Sul do Brasil 58
- Figura 5 - Mapa do modelo digital de elevação do terreno empregado no presente estudo..... 59
- Figura 6 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no ano safra 2011. Fonte: INPE, 2011; mapa adaptado do Projeto CANASAT. 60
- Figura 7 - Temperatura média do ar no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa 62
- Figura 8 - Temperatura média do ar do mês mais frio do ano no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa 63
- Figura 9 - Insolação diária anual média no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa 64
- Figura 10 - Precipitação anual média no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa 65
- Figura 11 - Evapotranspiração de referência anual média no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa 66
- Figura 12 - Déficit hídrico normal anual no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa 67
- Figura 13 - Excedente hídrico normal anual no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa 68
- Figura 14 - Produtividade potencial da cana planta de 18 meses, plantada no mês de fevereiro no Estado de São Paulo 70
- Figura 15 - Produtividade potencial da cana planta de 18 meses, plantada no mês de março no Estado de São Paulo 70
- Figura 16 - Produtividade potencial da cana planta de 15 meses, plantada no mês de julho no Estado de São Paulo 71

Figura 17 - Produtividade potencial da cana planta de 12 meses, plantada no mês de setembro no Estado de São Paulo	71
Figura 18 - Produtividade potencial da cana planta de 12 meses, plantada no mês de outubro no Estado de São Paulo	72
Figura 19 - Produtividade potencial ponderada da cana planta considerando-se diferentes épocas de plantio e ciclos, no Estado de São Paulo.....	72
Figura 20 - Produtividade potencial da cana soca precoce no Estado de São Paulo	73
Figura 21 - Produtividade potencial da cana soca média no Estado de São Paulo..	74
Figura 22 - Produtividade potencial da cana soca tardia no Estado de São Paulo...	74
Figura 23 - Produtividade potencial ponderada para a cana soca no Estado de São Paulo, considerando-se os diferentes ciclos de maturação (precoce, média e tardia)	75
Figura 24 - Produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, considerando-se as canas planta e soca, nas diferentes épocas de plantio e ciclos de maturação.....	76
Figura 25 - Produtividade atingível da cana planta de 18 meses, plantada no mês de fevereiro, no Estado de São Paulo	78
Figura 26 - Produtividade atingível da cana planta de 18 meses, plantada no mês de março, no Estado de São Paulo	79
Figura 27 - Produtividade atingível da cana planta de 15 meses, plantada no mês de julho, no Estado de São Paulo	79
Figura 28 - Produtividade atingível da cana planta de 12 meses, plantada no mês de setembro, no Estado de São Paulo	80
Figura 29 - Produtividade atingível da cana planta de 12 meses, plantada no mês de outubro, no Estado de São Paulo	80
Figura 30 - Produtividade atingível ponderada para a cana planta no Estado de São Paulo, considerando-se as diferentes épocas de plantio	81
Figura 31 - Produtividade atingível da cana soca precoce no Estado de São Paulo	82
Figura 32 - Produtividade atingível da cana soca média no Estado de São Paulo...	82
Figura 33 - Produtividade atingível da cana soca tardia no Estado de São Paulo....	83

Figura 34 - Produtividade atingível ponderada para a cana soca no Estado de São Paulo, considerando-se os diferentes ciclos de maturação (precoce, médio e tardio).....	83
Figura 35 - Produtividade atingível da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, considerando-se as canas planta e soca, nas diferentes épocas de plantio e ciclos de maturação	85
Figura 36 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em fevereiro.	86
Figura 37 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em março.....	86
Figura 38 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em julho (inverno)	87
Figura 39 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em setembro	87
Figura 40 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em outubro ..	88
Figura 41 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana planta Ponderada	88
Figura 42 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana soca de ciclo precoce	89
Figura 43 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana soca de ciclo médio	90
Figura 44 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana soca de ciclo tardio	90
Figura 45 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana soca Ponderada.....	91
Figura 46 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado considerando a ponderação de todas as épocas de cultivo simuladas (planta e soca).....	92
Figura 47 - Probabilidade de ocorrência de temperatura mínima absoluta no abrigo meteorológico menor do que 2 °C	93
Figura 48 - Fator de penalização da produtividade pelo estresse por frio	94

Figura 49 - Produtividade potencial ponderada da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, considerando o efeito de penalização pelo estresse térmico	95
Figura 50 - Produtividade atingível ponderada da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, considerando o efeito de penalização pelo estresse térmico	95
Figura 51 - Relação entre a produtividade real, proveniente do banco de dados do IBGE, e a produtividade atingível, estimada pelo modelo agrometeorológico, sem (a) e com (b) a penalização pelo fator de estresse térmico	96
Figura 52 - Relação entre a quebra de produtividade e o déficit hídrico anual das regiões canavieiras do Estado de São Paulo.....	97
Figura 53 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Assis, SP	99
Figura 54 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Araçatuba, SP	99
Figura 55 - Distribuição dos resíduos da produtividade atingível em torno da distribuição teórica normal de probabilidades, em Araçatuba, SP	100
Figura 56 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Guaira, SP	100
Figura 57 - Distribuição dos resíduos da produtividade atingível em torno da distribuição teórica normal de probabilidades, em Guaira, SP.....	101
Figura 58 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Piracicaba, SP	101
Figura 59 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Ribeirão Preto, SP	102
Figura 60 - Distribuição dos resíduos da produtividade atingível em torno da distribuição teórica normal de probabilidades, em Ribeirão Preto, SP ..	102
Figura 61 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de São José do Rio Preto, SP	103
Figura 62 - Classificação dos ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar (a) sob o ponto de vista climático de produtividade atingível e (b) sob o ponto de vista climático da eficiência climática	104

Figura 63 - Representação espacial do estudo de caso para alguns municípios de São Paulo considerando o enfoque da classificação dos ambientes de produção pela produtividade atingível (a) e eficiência climática (b)..... 105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo hídrico médio diário de cana-de-açúcar sob diferentes locais e ciclo da cultura	25
Tabela 2 - Localização geográfica das estações meteorológicas do INMET que foram utilizadas para obter os coeficientes das equações de regressão linear múltipla para estimativa da insolação diária média em cada mês do ano..	37
Tabela 3 - Localização geográfica das estações meteorológicas do INMET que foram utilizadas para obter os coeficientes das equações de regressão linear múltipla para estimativa da temperatura média do ar em cada mês do ano	38
Tabela 4 - Épocas de plantio e colheita simuladas para os oito ciclos de cana-de-açúcar considerados, sendo que “CP” representam as canas “planta” e CS representam as canas “soca”	43
Tabela 5 - Valores do índice de área foliar (IAF) considerados em cada fase fenológica da cultura da cana-de-açúcar, considerando-se os diferentes ciclos de cana planta e cana soca	46
Tabela 6 - Coeficientes de resposta ao déficit hídrico (ky) empregados na estimativa da produtividade atingível (PA) da cultura da cana-de-açúcar.....	48
Tabela 7 - Valores do coeficiente de cultura (kc)	49
Tabela 8 - Probabilidades de ocorrência de geada (P(%)) e seus respectivos fatores de penalização “fgeada” da produtividade potencial e atingível.....	50
Tabela 9 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa da temperatura máxima média mensal e anual.	61
Tabela 10 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa da temperatura mínima média mensal e anual	61
Tabela 11 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa da insolação média diária mensal e anual	61
Tabela 12 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla	64
Tabela 13 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa das produtividades potenciais das canas planta (CP) e soca (CS) no Estado de São Paulo nos diferentes ciclos de cultivo	69
Tabela 14 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa das produtividades atingíveis das canas planta e soca no Estado de São Paulo.....	77

Tabela 15 - Coeficientes estatísticos de precisão (R^2), acurácia (d), desempenho (C) e erro médio (RMSE, t ha ⁻¹) como indicadores do desempenho do modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar, sem e com o fator de penalização por baixas temperaturas	97
Tabela 16 - Produtividade atingível provável para diferentes regiões produtoras de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo	98

LISTA DE SÍMBOLOS

C - coeficiente de confiança

d - coeficiente de Willmott

Da - Déficit hídrico anual, em mm

ET_o - evapotranspiração de referência.

EXC - Excedente hídrico anual, em mm

KS - coeficiente de significância do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov

η - Eficiência climática

n - insolação diária média, em horas.

ϕ - Latitude, em graus e décimos negativos

P - precipitação, em mm.

PA - Produtividade atingível, em $t\ ha^{-1}$

PP - Produtividade potencial, em $t\ ha^{-1}$

R² - Coeficiente de determinação

r – Coeficiente de correlação

RMSE - Root mean square error (Erro quadrático médio)

T_m - Temperatura média do ar, em °C

λ - Longitude, em graus e décimos negativos

ξ - altitude, em metros

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação da sociedade mundial com o ambiente vem causando uma grande polêmica além de gerar conflitos de ordem globalizada sobre o uso de compostos de origem fóssil, os quais são os principais combustíveis da matriz energética mundial. Por isso, os combustíveis fósseis ainda são os grandes responsáveis pela maioria das emissões de gases poluentes da atmosfera, tornando-se necessária a constante busca por alternativas para a substituição desses por outros menos emissores, os quais podem também chamados de combustíveis “limpos”.

Dentre as fontes alternativas de energia, o Brasil, por sua extensão territorial, tem capacidade de produzir as mais diversas delas, sendo a cana-de-açúcar a principal. O País é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, gerando energia renovável por meio da produção de álcool combustível e da co-geração de energia a partir da queima da palha e do bagaço. Atualmente, a cultura ocupa cerca de oito milhões de hectares, tendo uma produtividade média da ordem de 82 t ha^{-1} . A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) tem destaque hoje como fonte para a produção de açúcar, etanol e biomassa. Em decorrência disso, nota-se a necessidade em aumentar a produção para que a demanda crescente por alimentos, combustíveis e energia seja suprida.

A cana-de-açúcar é a fonte de energia renovável mais utilizada no Brasil, já que é uma planta bem adaptada às condições climáticas de grande parte do país. Além disso, a cultura proporciona altas produtividades, representando um total de 16% da demanda energética do país. O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional de cana-de-açúcar, apresentando cerca de 54% da área cultivada com essa cultura, ou seja, 4,4 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2010). Outros estados brasileiros apresentam áreas de cultivo bem menos expressivas, porém em franca expansão, especialmente nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Tocantins.

Para que a cultura da cana-de-açúcar apresente bons níveis de produtividade, quer seja nas áreas tradicionais de cultivo ou nas áreas em expansão, é de extrema importância que haja a seleção e alocação das diferentes variedades de acordo com os ambientes de produção. Atualmente, o conceito de ambientes de produção

envolve aspectos relacionados à qualidade dos solos e aos níveis de produtividade a serem obtidos neles (PRADO, 2011), não havendo, no entanto, aspectos relacionados, especificamente, ao clima dos locais de cultivo.

Uma das formas de se incorporar o clima na definição dos ambientes de produção é por meio do uso de modelos agrometeorológicos de estimativa da produtividade, a partir dos quais se estima a produtividade potencial e atingível, considerando-se as condições meteorológicas vigentes nas regiões de cultivo. A produtividade potencial expressa os efeitos das interações do genótipo com a radiação solar, o fotoperíodo e a temperatura, enquanto que a produtividade atingível é definida por essas interações e pela penalização delas pelo déficit hídrico, sendo a relação entre ambas denominada de eficiência climática.

Sendo assim, a hipótese do presente trabalho é de que o uso das informações provenientes da modelagem agrometeorológica pode contribuir para a melhor definição dos ambientes de produção da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, por meio da incorporação de informações com enfoque climático na classificação atualmente em uso. Para tanto, estabeleceu-se os seguintes objetivos:

a) Caracterizar climaticamente o Estado de São Paulo, por meio de mapas gerados a partir de modelos lineares, relacionando os atributos do clima e as coordenadas geográficas e a altitude;

b) Calibrar e testar o Modelo da FAO para a estimativa das produtividades potencial e atingível da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo;

c) Espacializar, por meio de um Sistema de Informações Geográficas e, dessa maneira, analisar e obter a variabilidade espaço-temporal das produtividades potencial e atingível da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo;

d) Classificar a produtividade atingível e a eficiência climática para subsidiar a reclassificação dos ambientes de produção com base em dados de solos e do clima, gerando informações mais consistentes para um melhor planejamento da produção canavieira no Estado de São Paulo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é classificada botanicamente como uma planta da família *Poaceae*, pertencente ao gênero *Saccharum*. Até o presente são conhecidas seis espécies, das quais se originam a grande variabilidade genética dos híbridos comerciais cultivados no Brasil. Essas espécies são: *S. officinarum*, *S. robustum*, *S. spontaneum*, *S. barberi*, *S. sinensi* e *S. edule* (MOZAMBANI, 2006).

Como a maioria das poáceas (gramíneas), a cana-de-açúcar é uma planta C4, assim chamada por formar compostos orgânicos com quatro carbonos durante a fotossíntese, além de apresentar alta taxa fotossintética e de eficiência na utilização e resgate de CO₂ (gás carbônico) da atmosfera (SEGATO et al., 2006).

Essa cultura é considerada como sendo de hábito “perene” por alguns pesquisadores (PARANHOS, 1987; TERRAMOTO, 2003; OLIVEIRA, 2004; RUDORFF, 2007), já que não necessita ser plantada ano após ano de cultivo. Por outro lado, outros pesquisadores a classificam como uma cultura semi-perene (DA SILVA, 2004; SIGUITANI, 2006; DOS SANTOS, 2008), já que após a operação de plantio dos toletes (mudas) a cultura permanece, em média, 5 anos (cortes) no campo. Conceitua-se “cana planta” como aquela em que a origem está nas mudas plantadas. Após o primeiro corte, a cultura rebrota, e nos seguintes ciclos de corte/brotação a cana é chamada de “cana soca” (CARVALHO, 2009). A Figura 1 apresenta o ciclo fenológico da cultura da cana-de-açúcar, segundo Gascho e Shih (1983), a qual se aplica tanto à cana planta como à cana soca.

Figura 1 - Estádios fenológicos da cana-de-açúcar e suas respectivas durações, em dias, do ciclo. Os valores do ciclo da direita se referem à cana-planta e os da esquerda à cana-soca. Fonte: Boletim da FAO nº 33, 1979

Com relação ao ciclo da cana-de-açúcar, Barbieri e Villa Nova (1977) e Marin et al. (2009) caracterizaram o plantio da cultura na região Centro Sul do Brasil em duas épocas características do ano: plantio em setembro - outubro, em que a colheita será feita com aproximadamente 12 meses (setembro - outubro do ano seguinte), caracterizando o sistema de plantio da “cana-de-ano”. Da mesma maneira ocorre o plantio realizado nos meses de janeiro a março, sendo que a colheita será realizada em setembro – outubro do ano seguinte e assim caracterizando o ciclo da “cana de ano e meio (18 meses)”. Isso acontece porque as condições meteorológicas no início do ciclo da cultura são as mais adequadas para a garantia do estabelecimento do estande de plantas na lavoura, assim como o acúmulo de sacarose, visto que ocorre uma queda bastante acentuada no regime de chuvas da região no período de abril a setembro, quando se dá a colheita (EMBRAPA, 2010). Em alguns casos, para o atendimento da demanda por matéria-prima, o plantio pode se estender pela estação seca, o que é denominado de plantio de inverno (EMBRAPA, 2011).

Para a cana-soca, os ciclos que predominam são os de 12 meses, desde a brotação da soqueira até a colheita.

2.2 A cana-de-açúcar no Brasil

De acordo com Scarpari (2002), a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma das mais antigas e importantes lavouras exploradas no Brasil. Com a crise do petróleo, em 1973, diversos países buscaram alternativas para a sua matriz energética. No Brasil, a estratégia foi elaborar um programa de produção de biocombustível, conhecido como “Programa Nacional do Álcool (Proálcool)”, destacadamente, o maior e mais duradouro esforço de substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis, em termos mundiais (NITSCH, 1991).

Dentro desse panorama, De Paula (2008) considera a cultura da cana-de-açúcar como a personagem de maior destaque atual pelo elevado valor econômico e estratégico tanto para a produção de açúcar e etanol, mas principalmente como fonte alternativa de energia renovável e de grande interesse internacional.

A cana-de-açúcar é uma cultura bastante difundida no Brasil e por isso é uma importante fonte de matéria prima para a indústria de açúcar, etanol e biomassa. Atualmente, o Brasil tem a maior área plantada da cultura, o que, segundo a FAO, corresponde em 2010/2011 a 8,1 milhões de hectares, com uma produtividade média de 82,1 t ha⁻¹.

Nos últimos anos houve aumento na área plantada e na produção, estimulados principalmente pelo aumento das exportações de açúcar e álcool anidro. O Brasil desponta como líder mundial em exportações de açúcar, além de ser líder mundial na utilização desta planta como fonte de energia renovável (OLIVEIRA, 2004).

Com relação aos avanços da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, Marques et al. (2007) afirmaram que mais recentemente com o aquecimento do setor sucroalcooleiro, o Protocolo de Kyoto e as altas no preço do barril de petróleo levaram a Transpetro, subsidiária da Petrobrás, a investir no setor sucroalcooleiro, para o transporte e exportação do etanol produzido no oeste de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais. A maior parte dos recursos deve ser investida no oeste e noroeste do Estado de São Paulo, onde se concentram grande parte das unidades produtoras.

De acordo com Argenton (2006), a lavoura canavieira assume papel importante no cenário econômico nacional e internacional, sendo o Brasil um dos países mais apropriados para a produção da cultura e seus derivados, já que possui condições

edafo-climáticas propícias em boa parte do país, disponibilidade de terras que não competem com a produção de alimentos, e custos de produção considerados baixos em relação a outros países produtores da cultura, como a Índia, a China, a Tailândia, o Paquistão, o México, a Colômbia, a África do Sul e a Austrália.

2.3 Exigências climáticas da cultura da cana-de-açúcar

2.3.1 Radiação Solar

A radiação solar é a maior fonte de energia para a Terra, sendo também o principal elemento meteorológico, pois é ela que desencadeia todo o processo meteorológico, afetando todos os outros elementos como a temperatura, a pressão, o vento, a chuva e a umidade (PEREIRA et al., 2002). Conforme Taiz e Zeiger (2004), toda energia necessária para a realização da fotossíntese, processo que transforma o CO₂ atmosférico em energia metabólica, é proveniente da radiação solar. Sendo assim, essa variável meteorológica é a base para o desenvolvimento de modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de plantas.

Segundo Marin et al. (2009), um dos fatores que explicam a absorção da radiação solar por uma cultura é a distribuição do ângulo de inserção das folhas, relação essa que pode ser representada na forma do coeficiente de extinção de radiação solar. Este, por sua vez, é função da arquitetura do dossel e do ângulo zenital do Sol. Conforme esses autores, folhas mais eretas, como observadas nos canaviais permitem o adensamento das plantas, maximizando o rendimento por área e explicando, em parte, os níveis de produtividade, em condições de campo. A cana-de-açúcar é uma espécie com ciclo fotossintético do tipo C₄, apresentando alta eficiência de conversão de energia radiante em energia química, quando submetida a condições de elevada temperatura do ar e radiação solar intensa, associadas à elevada disponibilidade de água no solo.

Segundo Casagrande (1996), o fato de a cana-de-açúcar ser classificada como planta de ciclo C₄, propicia a ela uma taxa de crescimento e eficiência do uso da água de duas a três vezes maior às observadas em plantas de ciclo metabólico C₃.

A cultura cresce bem em áreas que recebem energia solar de 18 a 36 MJ m⁻² dia⁻¹. O perfilhamento é afetado por intensidade e duração do brilho solar. Alta

intensidade de luz e longa duração do dia promovem o perfilhamento enquanto dias curtos e nublados afetam o perfilhamento de forma inversa. O crescimento do colmo aumenta quando o fotoperíodo está entre 10 e 14 horas. O índice de área foliar aumenta rapidamente entre o terceiro e o quinto mês, coincidindo com a fase de perfilhamento ou grande crescimento vegetativo e alcança seus valores máximos durante a fase de crescimento dos colmos, como mostra a Figura 1.

Segundo Robertson et al. (1999), mesmo a interceptação de radiação não sendo afetada pela ocorrência de períodos de estresse hídrico, uma redução de 5% na energia radiante interceptada reduz em 26% a biomassa total.

Estudos realizados por Vered e Rao (2010) mostraram que na cultura da cana-de-açúcar a proporção de conversão de energia em termos de produção de matéria seca por unidade de radiação solar interceptada teve uma resposta quadrática em relação à porcentagem de interceptação de luz. Isso indica que a proporção de conversão de energia aumentou de forma linear até 50% da intersecção de luz e acima desse nível a proporção da conversão fotossintética da radiação solar é reduzida. Da mesma forma, na cultura da cana-de-açúcar a cobertura superior intercepta 70% da radiação solar, enquanto que a proporção fotossintética das folhas inferiores diminui devido ao processo de sombreamento.

2.3.2 Temperatura

De acordo com Pereira et al. (2002), a temperatura do ar exerce influência sobre vários aspectos da produtividade vegetal, estando relacionada com o crescimento e desenvolvimento das plantas, devido ao seu efeito na velocidade das reações químicas e dos processos internos de transporte.

No caso da cana-de-açúcar, a temperatura do ar ótima para a brotação das gemas é de 32 a 38°C e para um ótimo desenvolvimento o ambiente deve ter temperaturas médias diárias entre 22 e 30°C, sendo que abaixo de 20°C, a taxa de crescimento diminui significativamente, devido à diminuição na taxa de alongamento dos colmos.

Valores de temperatura do ar inferiores a 15-21°C acarretam na paralisação do crescimento da cultura (DILLEWIJN, 1952; BARBIERI; VILLA NOVA, 1977; BACCHI; SOUZA, 1978; DOORENBOS; KASSAM, 1979; MAGALHÃES, 1987, BARBIERI et al., 1977; SCARPARI, 2002).

Geralmente, temperaturas altas são bem toleráveis pela cultura, desde que haja irrigação ou umidade no solo. Temperaturas entre 30 e 34°C favorecem as taxas máximas de crescimento, passando a ocorrer estresse térmico sob condições de temperatura acima dos 35°C e crescimento praticamente nulo quando a temperatura ultrapassa os 38°C.

Segundo Walkler (1969) e Logsdon et al. (1995) a temperatura do solo influencia na produção (biomassa radicular) e na elongação das raízes, o que permite inferir que o processo de absorção de água é indiretamente influenciado pela temperatura do solo.

2.3.3 Exigências hídricas da cana-de-açúcar

O principal fator limitante para a obtenção de elevadas produtividades da cana-de-açúcar é, sem dúvida alguma, a água. A partir disso, diversos autores tentaram formular conceitos e estratégias objetivando mensurar a resposta da cultura da cana-de-açúcar à água consumida.

Segundo Doorenbos e Pruitt (1975) e Thompson (1976), pode ocorrer déficit hídrico durante todo o ciclo da cultura, porém o efeito sobre a produtividade é variável de acordo com o estágio fenológico, a época do ciclo e, principalmente, a intensidade e duração do déficit hídrico.

Assim sendo, Doorenbos e Kassam (1979) afirmam que uma umidade disponível adequada durante o período vegetativo é importante para a obtenção da máxima produtividade, porque esse crescimento da cultura é diretamente proporcional à água transpirada. Dependendo do clima, requerimentos de água de 1500 a 2500 mm distribuídos uniformemente são exigidos ao longo do ciclo vegetativo da cana-de-açúcar. Entretanto, nas principais regiões produtoras do Brasil, a precipitação anual média não atinge esses níveis pluviométricos, sendo mais importante, portanto, a distribuição da precipitação ao longo do ano para que haja disponibilidade hídrica principalmente nos estádios fenológicos de crescimento. Por outro lado, Barbieri e Villa Nova (1977) afirmam que a região Centro-Sul do Brasil apresenta boas condições climáticas para o desenvolvimento e maturação de cana-de-açúcar com precipitação pluvial média anual entre 1250 a 1750 mm.

Segundo Segato et al. (2006), a relação consumo de água e produtividade fica entre 8 e 12 mm t⁻¹, na maioria das situações. De outra forma, esses mesmos

autores consideram que o estresse hídrico durante a estação de cultivo da cana-de-açúcar é o resultado de uma complexa combinação dos fatores do solo, da planta e da atmosfera. Informações sobre o consumo hídrico médio da cultura da cana-de-açúcar em lisímetros são apresentadas na Tabela 1, sendo que esses valores variaram de 2,3 até 5,7 mm dia⁻¹, de acordo com as condições climáticas do local de cultivo (PERES, 1988).

Tabela 1 - Consumo hídrico médio diário de cana-de-açúcar sob diferentes locais e ciclo da cultura

Autor	Ano	Local	ciclo da cultura	Consumo de água médio (mm dia ⁻¹)
Campbell et al.	1959	EUA (Havai)	Planta	5,70
Thompson et al.	1963	África do Sul	Planta	4,20
Thompson	1965	África do Sul	Planta	3,66
Chang & Wang	1968	Taiwan	Planta e Soca	4,80
Thompson & Boyce	1971	África do Sul	Planta	3,94
Early & Gregório	1974	Filipinas	Planta	3,10
Fogliata	1974	Argentina	Planta e Soca	4,36
Thompson	1976	África do Sul	1ª Soca	3,86
			2ª Soca	3,63
Shih & Gascho	1980	EUA (Flórida)	Planta e Soca	3,36
Barbieri	1981	Brasil	Planta	2,50
Chang et al.	1983	Taiwan	Planta	2,33
			1ª Soca	3,14
			2ª Soca	3,06
Yahng et al.	1985	Colômbia	Planta	3,33
			1ª Soca	3,57

Fonte: Peres (1988)

Chang (1961) observou em experimentos realizados no Hawaii, que o consumo hídrico da cultura foi, durante o inverno, de 3 a 5 mm dia⁻¹, enquanto que no verão esse consumo aumentou para 7 a 9 mm dia⁻¹.

Pesquisas realizadas por Fauconier e Bassereau (1970), indicaram que um canavial com produtividade de 100 t ha⁻¹ de colmos consumia cerca de 1500 mm de água durante o ciclo. Sabendo-se que a quantidade de água contida em 100 t de colmos está entre 75 e 85 t, pode-se concluir que para cada 150 ou 200 kg de água transpirada pelo canavial, cerca de 1 kg de matéria seca é sintetizada pela cultura.

Thompson (1976), de acordo com estudos lisimétricos com a cultura da cana, encontrou uma relação empírica a qual considerava que cada 10 mm evapotranspirados pela cultura correspondia a 1 t ha⁻¹ produzidas. Da mesma maneira, em estudos enfocando o consumo de água e produção de massa seca pela cultura, Campbell et al. (1960) relatam que cerca de 50 g de água é requerida para a produção de 1 g de matéria seca. Analisando-se as afirmações feitas pelos pesquisadores acima, pode-se concluir que a relação de consumo hídrico com a

produção de matéria seca é variável, de acordo com as condições climáticas do local de cultivo, além das condições de manejo do solo e da cultura.

Apesar do déficit hídrico ser de extrema importância para a produção de cana-de-açúcar, o excesso de água durante a colheita é um fator que pode vir a interferir não apenas na qualidade industrial, mas também nas condições apropriadas para a realização da colheita. Segundo Marin et al. (2009), a ocorrência de chuvas durante o período de colheita tem impacto direto no planejamento operacional de usinas de cana-de-açúcar, uma vez que o corte, o carregamento e o transporte são prejudicados. Além disso, durante os períodos em que o tráfego de máquinas é intenso sobre o canavial, o excesso de umidade favorece a compactação do solo, o que poderá acarretar redução na produtividade da safra seguinte.

De acordo com Taiz e Zeiger (1991), o déficit hídrico não afeta apenas regiões classificadas climaticamente como áridas ou semiáridas. Essa ocorrência pode se pronunciar em locais em que a distribuição das chuvas não é uniforme, afetando o crescimento das plantas e reduzindo a produtividade dos cultivos.

Assim sendo, a irrigação, sob diferentes métodos de aplicação, incrementa a produtividade da cana-de-açúcar de maneira bastante satisfatória. Darli et al. (2008), em Botucatu, SP, obtiveram em cultivo irrigado de cana planta (16 meses) com início de ciclo no mês de março, uma produtividade média de 300 t ha^{-1} , ou seja, aproximadamente 50% da produtividade da cultura em cultivo de sequeiro. Souza et al. (1999) obtiveram em cultivo de cana planta de 13 meses no município de Goytacazes, RJ, um incremento máximo de $84,1 \text{ t ha}^{-1}$ para a variedade RB72454. Na região de Piracicaba, SP, Carretero (1982) obteve um incremento na produtividade de um cultivo irrigado por gotejamento da ordem de 20 t ha^{-1} , representando 16% de incremento em relação à cana soca sob condições de sequeiro.

2.4 Uso de modelos de simulação na agricultura

A aplicação de modelos matemático-fisiológicos em agricultura tem sido cada vez mais utilizada no que tange ao fornecimento de ferramentas para sistemas de suporte às tomadas de decisão. O homem vem utilizando, mesmo que inconscientemente, simulações reais de futuros processos para estar pronto para

enfrentar os acontecimentos. A simulação é, portanto, uma analogia com a realidade, sendo comum a muitas áreas. Segundo Lazinski (1993), os modelos agrometeorológicos e a interpretação de dados climáticos relacionados com o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas fornecem informações que permitem ao setor agrícola tomar importantes decisões, tais como: melhor planejamento do uso do solo; adaptação de culturas; monitoramento e previsão de safras; controle de pragas e doenças; e estratégias de pesquisa e planejamento.

Dessa maneira, vem-se aperfeiçoando métodos com os quais seja possível fazer estimativas de produtividade em nível local, regional e até nacional. Essas estimativas são realizadas basicamente por meio do uso de modelos matemático-fisiológicos, os quais buscam simular o que realmente ocorre, porém de maneira simplificada, nos sistemas agrícolas.

De maneira geral, pode-se entender que um modelo matemático-fisiológico é uma rotina (ou conjunto de rotinas) que busca explicar o desempenho de determinado sistema agrícola, ou parte dele, de maneira simplificada, porém contendo as principais condicionantes desse sistema.

Sistemas agrícolas são, por natureza, complexos, o que torna o uso dos modelos de simulação bastante útil em diversas práticas agrícolas e na caracterização dos ambientes de produção. Ainda nesse contexto, devido ao avanço na área de informática e processamento de dados, atualmente é possível fazer diversas simulações utilizando esses modelos, principalmente na área de mudanças climáticas e seus impactos na produtividade das culturas e meio ambiente, como, por exemplo, emissão de gases do efeito estufa e diferentes simulações da concentração de CO₂ na atmosfera e suas implicações na agricultura. Na utilização de modelos de simulação, principalmente de modelos de simulação de culturas agrícolas, é de extrema importância que se conheça de maneira aprofundada a fisiologia da planta, ou seja, como são os processos fisiológicos não apenas de acúmulo de biomassa, mas como a cultura age em processos de absorção de energia e transformação dessa energia em carboidratos.

Os modelos não são apenas utilizados para a estimativa da produtividade, mas também para a caracterização do ciclo das culturas, planejamento da época de semeadura e colheita (ROBERTSON, 1983). A maioria dos modelos propostos para a estimativa da produção das culturas penaliza a produtividade potencial por meio do déficit hídrico, determinado pelo balanço hídrico da cultura. De acordo com

Thompson (1970), a precipitação pluvial é o elemento meteorológico mais empregado no desenvolvimento de modelos previsores de safra, sendo o primeiro a ser adotado para caracterizar o efeito da seca nas culturas agrícolas.

Segundo Correa (2008), apesar de haver alguns exemplos de sucesso, as técnicas de modelagem não estão sendo desenvolvidas, nem utilizadas em seu pleno potencial. Para que a utilização desses modelos seja efetiva, necessita-se de melhorias nos sistemas de aquisição de dados meteorológicos e na disponibilização desses dados para a sociedade científica, já que esses são, muitas vezes, os “gargalos” de trabalhos com modelagem e simulação em agricultura. No Brasil, vários trabalhos vêm sendo realizados na área de modelagem agrometeorológica para previsão de safras agrícolas. Mesmo assim, ainda há muito para explorar nessa área da ciência.

No caso da utilização da modelagem agrometeorológica para sistemas de previsão de safra agrícola, alguns trabalhos são de relativa importância em nível nacional, no caso de grandes culturas como a soja (ASSAD et al., 2007; CAMARGO et al., 1986), café (SANTOS; CAMARGO, 2006) milho (ANDRIOLI; SENTELHAS, 2009;), cana-de-açúcar (PEREIRA; MACHADO, 1986; BARBIERI, 1993; MAXIMILIANO, 2002; DELGADO ROJAS; BARBIERI, 1999) e outras culturas não tanto tradicionais em estudos de modelagem, embora importantes para a economia do país, como por exemplo a laranja (CAMARGO et al., 1999).

2.4.1 Modelos agrometeorológicos e simuladores utilizados para a cultura da cana-de-açúcar

Em diversos países do mundo estão sendo testados, desenvolvidos e utilizados modelos com aplicações à estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, dada a importância dessa cultura para a produção de etanol, açúcar e energia elétrica. Desse modo, o uso de modelos de simulação pode ser justificado pelo seu emprego em estudos referentes à escolha de variedades mais adequadas para a alocação em determinada área (SARTORI et al., 2001; RAMBURAN et al., 2009), ao destino da biomassa residual da colheita mecanizada da cultura (SARTORI; FLORENTINO, 2002; TOLENTINO et al., 2007), ao fluxo de metais pesados presentes no ambiente de cultivo da cana-de-açúcar (DA SILVA et al., 2007) e no planejamento da expansão da cultura para novas áreas. Contudo, há um grande número de estudos

abrangendo, principalmente, a área de modelagem no que diz respeito ao crescimento, desenvolvimento e acúmulo de biomassa e desempenho fisiológico da cana-de-açúcar sob diferentes condições edafo-climáticas, condições de manejo da cultura e da irrigação.

Nesse sentido e com o avanço dos sistemas computacionais, ficou relativamente facilitada a utilização dos processos de simulação. Basicamente, esses modelos referem-se a algumas simplificações do processo de fotossíntese, ou seja, interceptação de radiação solar, juntamente com a absorção de CO₂ atmosférico e água, transformando esses compostos em fotoassimilados (principalmente em carboidratos) os quais serão acumulados nos órgãos de reserva da cultura, que no caso da cana-de-açúcar é o colmo.

Dentre esses modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar se pode citar o modelo desenvolvido na África do Sul, denominado de *CANEGRO* (INMAN-BAMBER, 1991), modelo mecanístico o qual faz parte do *Decision Support System for Agrotechnology* (DSSAT); o modelo australiano Agricultural Production System SIMulator (*APSIM-Sugarcane*) (KEATING et al., 1999), o qual é o resultado da junção dos modelos *AUSCANE* (JONES et al., 1989) e *EPIC* (WILLIAMS et al., 1984), sendo o primeiro relativo às simulações da cultura e o segundo aos processos no solo, incluindo a simulação de processos erosivos; *QCANE* (LIU; KINGSTON, 1995), modelo relativamente novo, porém menos utilizado para processos de simulação de acúmulo de biomassa na cultura da cana-de-açúcar; *SIMCANA* (PEREIRA; MACHADO, 1986), modelo matemático-fisiológico, desenvolvido no Brasil; o modelo da *Zona Agroecológica* (Modelo FAO), apresentado por Doorenbos e Kassam (1994), que relaciona a quebra relativa de produtividade ao déficit hídrico relativo por meio de um coeficiente de resposta da cultura ao déficit hídrico em cada fase fenológica de seu ciclo. Esse modelo, embora seja genérico, pode ser aplicado em sistemas de previsão de safra já que, além de ser um modelo de simples utilização, vem apresentando resultados bastante satisfatórios (TERAMOTO, 2003; MARIN et al., 2008; GOUVÊA et al., 2009); o modelo *SWAP* que ainda está sendo pouco utilizado para a cultura da cana-de-açúcar, porém já há alguns estudos empregando esse modelo na determinação do manejo da irrigação (QURESHI et al., 2002) e no crescimento e produtividade da cultura da cana-de-açúcar (SCARPARE, 2011). Ainda nesse sentido, podem ser encontrados outros modelos de simulação da dinâmica de carbono em

agrossistemas de cana-de-açúcar, como por exemplo, o modelo *CENTURY* (GALDOS et al., 2009).

2.4.2 Modelo da Zona Agroecológica (Modelo FAO)

O modelo da Zona Agroecológica é um modelo genérico, que possui ampla aplicação em estudos não apenas de simulação da produtividade de culturas, mas também em estudos condizentes ao zoneamento agroclimático e na determinação de épocas mais apropriadas para o plantio e semeadura. Esse modelo é segmentado em duas etapas: a primeira relacionada à estimativa da produtividade potencial (PP) e a segunda à penalização dessa pelo déficit hídrico, obtendo-se a produtividade atingível (PA).

Entende-se por produtividade potencial aquela obtida por uma variedade altamente produtiva e bem adaptada ao respectivo ambiente de crescimento, sem estresse hídrico, nutricional, salinidade e fitossanitário (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Sendo assim, De Wit (1965) propôs que a estimativa da produtividade bruta de matéria seca diária por uma cultura padrão que, hipoteticamente, recobriria todo o terreno, seria apenas função da interação entre esse genótipo e as condições de radiação solar incidente, fotoperíodo e temperatura do local de cultivo.

Por isso é necessária não apenas a introdução de coeficientes de correção nesse modelo: coeficiente de respiração, o qual está relacionado à temperatura do ar; coeficiente do índice de área foliar, o qual simula a evolução da área foliar da cultura de interesse de acordo com a fase fenológica; coeficiente de colheita, o qual relaciona o percentual do produto comercial de interesse em relação à fitomassa total produzida; coeficiente de umidade, o qual adiciona umidade à parte de interesse econômico. Concomitantemente aos coeficientes de ajuste, deve-se considerar o número de dias em que a cultura permanece no campo e, por isso, é necessário a especificação do número de dias do ciclo.

A segunda etapa do modelo diz respeito ao efeito do déficit hídrico na produtividade das culturas. Dessa maneira, Doorenbos e Kassam (1994) propuseram que a quebra de produtividade potencial ($1 - PA/PP$) se relaciona diretamente ao déficit hídrico relativo da cultura ($1 - ET_r/ET_m$), por meio de um coeficiente de resposta da cultura ao déficit hídrico (k_y) em cada fase fenológica do ciclo. Por meio dessas relações, é possível se estimar a PA da cultura. .

2.5 Eficiência climática e eficiência agrícola da cana-de-açúcar

Diversas áreas da ciência utilizam o conceito de “eficiência” como um fator que expressa a capacidade de um sistema em transformar a energia concedida por alguma fonte, a qual de modo geral está fora do volume de controle, em energia útil para realizar os processos dentro daquele volume.

Nos sistemas agrícolas, o conceito de eficiência foi adaptado de modo a expressar quanto efetivamente foi produzido de uma determinada cultura em relação à sua produtividade potencial, em sistemas irrigados, ou atingível, em sistemas de sequeiro.

Marin (2005) justifica que a aplicação de modelos agrometeorológicos para estimativa da produtividade potencial e o relacionamento desta com a produtividade real é uma abordagem possível para o estudo do fator “eficiência” na produção agrícola. Tal abordagem foi primeiramente apresentada por Monteith (1977), que considerou a relação entre a energia interceptada pela cultura e a energia transformada em matéria seca como sendo a eficiência climática da cultura (η). De acordo com esse mesmo autor, a eficiência de conversão (η) é a derivada da inclinação linear da curva que representa a relação entre a matéria seca acumulada e a energia interceptada e absorvida, quando fatores como água e nutrientes não são limitantes ao crescimento da cultura. De posse do conceito de eficiência climática, pode-se inferir que esse índice varia como uma função inversa ao déficit hídrico, ou seja, quanto maior o déficit hídrico em uma determinada região de cultivo, menor será a eficiência climática, necessitando-se de variedades mais exigentes para se atingir as produtividades mínimas exigidas pela indústria canavieira. Realizando-se uma análise mais geral, pode-se afirmar que a eficiência climática é função apenas da interação entre as variáveis meteorológicas onde está alocada a lavoura. Esse índice independe das condições de manejo da cultura e das condições do solo (fertilidade do solo, textura, porosidade e água disponível) e da variedade utilizada no sistema de cultivo.

Marin et al. (2008) adaptaram o conceito de Monteith (1972, 1977), considerando que a relação entre a produtividade real observada, proveniente do banco de dados do IBGE e a produtividade atingível estimada expressaria a eficiência agrícola de uma cultura. Esses mesmos autores utilizaram a modelagem

agrometeorológica por meio do modelo de estimativa de produtividade potencial da Zona Agroecológica (MZA) e sua penalização pelo déficit hídrico, juntamente com o conceito de eficiência agrícola para avaliar o desempenho da cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Esses autores alegam que a geoespacialização desse índice pode servir como subsídio para estratégias no setor agrícola, como definição das melhores áreas, cultivares e melhor manejo do solo para o melhor aproveitamento do potencial produtivo da cultura na região.

Utilizando o conceito de eficiência da produção agrícola, Carvalho (2009) concluiu que esse índice tem grande importância tanto na área agrícola como na área sócio-econômica de uma dada região. Resultados obtidos pelo autor mostraram que foi possível verificar que para cada ponto porcentual de aumento na eficiência de produção da cana, tem-se um acréscimo de $0,8 \text{ t ha}^{-1}$ em média, o que representa um valor expressivo se for considerada a área cultivada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Com isso, pode-se inferir que um aumento de 1% na eficiência agrícola representa, em média, um aumento de cerca de 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

Do mesmo modo, esse autor percebeu melhorias no índice referente à eficiência agrícola ao longo das safras entre 1990 e 2006, com aumento do valor da eficiência agrícola de 0,42 para 0,58, nesse período. Esses aumentos tiveram ainda mais expressividade nas áreas com eficiência acima de 80%, indicando intensificação no processo produtivo ao longo do tempo, por meio de melhores técnicas de manejo dos solos e das culturas.

2.6 Solos e ambientes de produção para a cana-de-açúcar

Como o Brasil é um dos mais tradicionais produtores de cana-de-açúcar e possui grande extensão territorial, essa cultura é cultivada em vários tipos de solos os quais estão sob influência de diferentes climas, o que resulta em vários tipos de ambientes para produção (DIAS, 1997).

Inicialmente, Joaquim (1994) lançou a idéia de classificar os ambientes de produção de acordo com o solo, designando níveis de A a E, e com as classes de produtividade. Assim, na medida em que os ambientes tramitam de A para E, os elementos do solo vão restringindo cada vez mais a produtividade da cultura, sendo que a fertilidade do solo foi considerada como o único fator limitante.

Posteriormente, o Instituto Agrônomo de Campinas lançou o sistema designado de AMBICANA (PRADO, 2002), considerando a disponibilidade de água no solo (alta, média e baixa), a fertilidade natural e a CTC da camada arável. Esses critérios permitiram explicar por que solos com alto potencial nutricional e com baixa disponibilidade de água enquadram-se nos ambientes mais restritivos.

Sabe-se que é de extrema importância a consideração dos fatores climáticos na classificação dos ambientes de produção. Em 2010, Prado (2010) modificou a consideração do fator hídrico na classificação dos ambientes de produção, adotando o que denominou de “pedoclimas” (extremamente favoráveis, muito favorável, favorável, muito desfavorável, muito desfavorável e extremamente desfavorável) em vez de água disponível alta, média ou baixa. Essa modificação baseou-se na constatação da ocorrência em dois ambientes de produção para um mesmo Latossolo Vermelho Eutrófico na Usina Jalles Machado, em Goianésia (GO). No local de menor altitude e menor precipitação, o citado solo enquadrava-se no ambiente “D1”. Por outro lado, quando esse mesmo solo ocorria acima da serra e com maior pluviometria, enquadrava-se como ambiente “C2”.

Tendo em vista os exemplos citados acima, fica evidente que ainda há a necessidade de estudos que englobem a interação “clima-solo” nas definições dos ambientes de produção para a cana-de-açúcar. Uma das formas de se fazer isso é por meio dos modelos agrometeorológicos para a simulação do desempenho da cultura em termos do seu potencial produtivo ou produtividade atingível em diferentes ambientes, o que permitiria um refinamento da classificação dos ambientes de produção, em função do solo e do clima, nas regiões produtoras da cana-de-açúcar.

Sendo assim, a utilização das técnicas de modelagem permitem elaborar critérios e intervalos de classificação não apenas qualitativos, mas também quantitativos. Dessa maneira pode se obter respostas para as questões que até então estavam em aberto. Com base em argumentos mais consistentes pode-se explicar ao produtor e às usinas processadoras da cana, o motivo pelo qual regiões com um solo potencialmente muito favorável a altas produtividades não consiga expressar esse potencial em termos de produtividade, devido às condições climáticas predominantes. Prado et al. (2008) não levaram em consideração as características climáticas da região para a definição dos ambientes de produção, o que acarretou em desvios, especialmente em relação à produtividade da cultura. A

inserção dos fatores meteorológicos, juntamente com o solo mostra-se como um aspecto bastante importante e plausível, no que tange ao entendimento mais realista dos fatores limitantes da produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

A introdução da produtividade observada como variável para a definição dos ambientes de produção vem sendo bastante empregado ultimamente e leva em conta a média de 5 cortes e consideram características de disponibilidade de água do solo, química do solo na camada arável, mas não consideram a aplicação de torta de filtro ou vinhaça (PRADO et al. 2008). Esses ambientes são divididos em 10 níveis (ou classes), os quais consideram incrementos de 4 t ha^{-1} de uma classe para outra. De acordo com essa classificação, a região Centro-Sul do país apresenta classes (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, E2) que compreendem valores médios de produtividade maiores que 100 t ha^{-1} (ambiente mais favorável, A1) até produtividade menores do que 68 t ha^{-1} (ambiente mais restritivo, E2).

Para a Região Nordeste, a classificação dos ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar é um pouco diferente, considerando níveis mais baixos de produtividade (PRADO et al., 2011). Assim, um ambiente A1, no caso o mais favorável à produção de cana, apresenta produtividades acima de 85 t ha^{-1} , o que se deve às condições de solo e, principalmente, à ocorrência de déficit hídrico acentuado naquela região em grande parte do ciclo.

Segundo Maule et al. (2001), esses fatores que interferem na produção e qualidade da cana-de-açúcar, estão sendo constantemente estudados sob diferentes aspectos. Estudar a cultura no seu ambiente de desenvolvimento (considerando fatores de solo e clima) pode gerar uma enorme quantidade de informações para adequar as melhores técnicas de manejo e seleção de cultivares para os específicos ambientes. Assim é possível explorar ao máximo o local de produção para promover o melhor rendimento da cultura e, conseqüentemente, maior lucratividade ou competitividade para as agroindústrias da cana-de-açúcar.

O estudo dos ambientes de produção considerando-se a associação entre as variáveis do solo e do clima mostra-se como uma alternativa viável para explicar e justificar o porquê uma região definida como pertencente ao ambiente de produção “A1” pode vir a ter produtividades menores do que 100 t ha^{-1} , em condições de solo bastante favoráveis à ocorrência de altas produtividades. Assim sendo, justifica-se a importância na continuidade de estudos referentes à eficiência climática e agrícola da cultura da cana-de-açúcar visando à definição dos ambientes mais favoráveis ao

seu cultivo e servindo de subsídio para uma nova metodologia visando à classificação dos ambientes de produção.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção e processamento dos dados meteorológicos

Os dados meteorológicos necessários para a utilização do modelo agrometeorológico da FAO, utilizado para as estimativas das produtividades potencial e atingível, foram: temperatura média do ar; precipitação e insolação. Esses dados foram ajustados para escala decendial, já que é nessa escala que a planilha eletrônica foi devidamente programada com as equações relativas àquele modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade visando à obtenção dos resultados inerentes às simulações.

Para a aquisição dos dados de precipitação, foram acessados 178 postos de coleta de dados (PCD) referentes aos municípios do Estado de São Paulo e algumas PCDs dos Estados do Paraná e Minas Gerais, nas regiões limítrofes do estado (Figura 2), para posteriormente realizar os processos de interpolação para a elaboração dos mapas climáticos, de produtividade e de eficiência climática. Os dados de precipitação foram obtidos por meio do acesso ao site da Agência Nacional de Águas (ANA, 2011) - Sistema de Informações Hidrológicas “HidroWeb”, durante o período de 31 anos (1973 - 2003). Nos casos em que houve falhas nas séries de dados de precipitação, o preenchimento dessas foi feito por meio do acesso a outro PCD do mesmo município.

Devido à escassez de séries históricas disponíveis de dados referentes à insolação diária e à temperatura média, foram empregados os dados normais dessas variáveis obtidos por meio do acesso às Normais Climatológicas publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2010). A localização geográfica das estações que deram origem a esses dados são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, assim como seus respectivos valores médios mensais.

Figura 2 - Localização geográfica dos postos de coleta de dados pluviométricos

Ainda que esses dados estejam disponíveis, atualmente a rede de estações meteorológicas no país é bastante restrita tanto na totalidade do território brasileiro como no Estado de São Paulo. Sendo assim, para a estimativa dos valores das variáveis meteorológicas “temperatura média do ar (°C)” e “insolação média diária (horas dia⁻¹)” para cada uma das 178 localidades, foram geradas equações de regressão linear múltipla (Equação 1), utilizando como variáveis independentes as coordenadas geográficas e suas combinações, conforme recomendação de Alvarez et al. (2011):

$$VarMet = a + b\phi + c\lambda + d\xi + e\phi\lambda + f\phi\xi + g\lambda\xi + h\phi^2 + i\lambda^2 + j\xi^2 + \varepsilon \quad (1)$$

em que: VarMet é a variável meteorológica a ser estimada (temperatura média mensal e a insolação média diária); ϕ a latitude (em graus e décimos negativos); λ a longitude (em graus e décimos negativos); ξ a altitude do local (em metros); a representa a intersecção com o eixo “y”, ou seja, o coeficiente linear da equação de regressão; b , c , d , e , f , g , h , i e j representam os coeficientes angulares da equação de regressão múltipla; ε representa o erro que está associado ao desvio do valor observado em relação ao estimado pela equação de regressão linear múltipla.

Tabela 2 - Localização geográfica das estações meteorológicas do INMET que foram utilizadas para obter os coeficientes das equações de regressão linear múltipla para estimativa da insolação diária média em cada mês do ano

Município	Lat	Long	Alt	Meses											
	(graus e décimos)	(m)	(m)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Araçatuba	-20,87	-50,48	439	6,9	7,4	7,4	8,1	7,5	7,5	7,9	8,2	6,7	7,3	7,9	6,4
Barretos	-20,57	-48,57	538	6,7	6,2	7,3	8,0	8,4	8,0	8,7	8,6	7,1	6,7	6,7	6,1
Campinas	-22,90	-47,07	676	6,3	6,3	7,1	7,7	7,6	7,2	8,1	8,0	6,6	6,9	6,9	5,7
Campos do Jordão	-22,72	-45,57	1586	4,4	3,8	4,9	5,4	5,9	5,7	6,6	6,4	5,2	4,8	4,8	3,8
Catanduva	-21,14	-48,97	518	6,6	6,2	7,3	7,9	7,8	7,7	8,4	8,3	6,9	7,2	7,2	6,5
Colina	-20,70	-48,70	560	6,8	6,3	7,4	8,0	8,4	7,9	8,3	8,3	6,8	6,6	6,6	6,5
Franca	-20,55	-47,42	981	5,6	5,5	6,4	6,9	7,7	7,7	8,5	8,0	6,3	6,5	6,5	5,3
Gália	-22,32	-49,53	542	6,7	6,8	7,2	7,4	6,6	6,8	7,2	7,6	6,7	7,7	7,7	6,6
Igarapava	-20,03	-47,75	570	5,9	5,0	6,9	7,7	8,0	7,7	8,3	8,3	6,8	5,9	5,9	5,7
Iguape	-24,70	-47,55	107	5,2	4,6	4,5	4,2	4,5	3,9	3,9	3,2	2,3	3,2	3,2	4,6
Itapeva	-23,97	-48,87	654	6,4	5,8	6,2	5,9	6,0	5,6	6,6	6,3	5,3	6,5	6,5	5,7
Itararé	-23,05	-47,33	599	5,6	5,9	5,9	5,9	6,0	6,2	6,0	6,6	5,7	6,1	6,1	5,2
Jaú	-22,30	-48,53	519	6,5	7,1	7,5	8,2	7,8	7,7	8,2	8,3	7,3	7,4	7,4	6,4
Limeira	-22,57	-47,37	620	5,8	6,5	6,9	7,1	6,6	6,4	7,0	7,2	6,5	6,9	6,9	5,4
Mococa	-21,43	-46,85	905	6,2	6,5	6,9	7,2	6,8	6,5	7,1	7,1	6,4	6,8	6,8	6,0
Monte alegre do Sul	-22,70	-46,67	762	6,1	6,5	6,9	7,4	6,9	7,0	7,4	7,6	6,9	7,0	7,0	6,1
Nova Odessa	-22,77	-47,28	566	6,6	7,0	7,4	7,7	6,9	7,1	7,8	7,9	6,9	7,6	7,6	6,2
Pindamonhangaba	-22,77	-45,52	544	5,4	6,2	6,2	6,3	6,1	6,2	6,6	6,8	5,9	5,7	5,7	5,1
Pindorama	-21,22	-48,90	540	5,8	6,4	6,6	7,2	6,7	6,6	7,3	7,2	6,4	6,7	6,7	5,6
Presidente Prudente	-22,12	-51,38	455	6,6	6,2	7,1	7,4	6,9	6,4	7,4	7,0	5,6	6,9	6,9	6,3
Santos	-23,75	-45,85	13	5,0	4,8	5,0	4,7	5,1	4,6	4,9	4,4	2,8	3,5	3,5	4,3
São Carlos	-21,87	-47,80	715	5,9	5,9	6,4	6,4	6,9	6,7	7,7	7,2	5,9	6,8	6,8	5,0
São Paulo	-23,55	-46,63	774	5,5	5,2	5,4	5,3	5,9	5,6	6,0	5,7	4,9	5,0	5,0	4,9
São Simão	-21,47	-47,55	807	6,2	5,8	7,0	7,7	7,7	7,6	8,1	8,2	6,6	6,6	6,6	5,5
São José dos Campos	-23,18	-45,88	605	5,8	4,9	5,8	5,8	5,7	5,8	6,1	6,4	5,1	4,8	4,8	5,3
Tatuí	-23,40	-47,77	538	5,9	6,3	6,5	6,8	6,3	6,0	6,6	6,9	5,9	6,3	6,3	5,6
Taubaté	-23,03	-45,57	588	5,5	5,4	5,8	5,7	5,7	5,7	6,1	6,0	5,1	4,8	4,8	5,0
Tietê	-23,10	-47,72	494	6,7	7,0	7,2	7,4	6,7	6,6	7,2	7,2	6,7	7,2	7,2	6,5
Tremembé	-22,97	-45,53	565	5,1	4,7	5,2	5,4	5,4	5,3	6,1	6,0	5,0	4,8	4,8	4,6
Ubatuba	-23,38	-45,08	235	4,8	4,8	5,0	4,6	4,8	5,1	5,1	4,6	3,5	3,4	3,4	4,2

Tabela 3 - Localização geográfica das estações meteorológicas do INMET que foram utilizadas para obter os coeficientes das equações de regressão linear múltipla para estimativa da temperatura média do ar em cada mês do ano

Município	Lat	Long	Alt	Meses											
	(graus e décimos)	(m)	(m)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Adamantina	-21,67	-51,07	411	26,1	25,9	25,5	24,3	21,4	20,3	21,0	22,3	24,0	25,5	25,5	26,0
Assis	-22,67	-50,37	529	24,7	24,5	24,7	22,5	18,9	18,4	18,1	19,8	21,2	23,4	23,6	24,1
Barretos	-20,57	-48,57	547	26,6	26,5	26,2	24,6	21,6	20,4	20,8	22,8	24,8	26,4	25,8	26,6
Bauru	-22,31	-49,06	507	23,7	23,9	23,6	22,8	20,2	18,9	18,4	20,1	22,1	22,3	22,8	24,0
Campinas	-22,90	-47,07	676	23,0	23,6	23,2	21,4	19,5	17,7	17,1	18,9	19,9	21,0	22,0	22,5
Campos do Jordão	-22,72	-45,57	1586	19,2	18,5	17,9	15,9	12,7	11,3	10,9	12,2	14,9	16,7	17,2	18,1
Capão Bonito	-24,00	-48,37	657	23,8	23,3	22,7	20,9	18,1	16,5	16,5	18,1	19,0	20,9	21,4	22,7
Casa Branca	-21,77	-47,08	706	24,2	24,1	23,7	22,3	19,4	18,1	18,0	21,5	21,4	22,9	23,2	24,0
Cordeirópolis	-22,52	-47,45	642	24,6	24,3	23,7	21,8	18,8	18,3	17,9	20,3	21,2	23,0	23,2	23,4
Franca	-20,55	-47,42	981	23,9	24,3	23,5	22,2	20,0	18,8	18,5	20,3	21,8	23,6	23,7	23,6
Guaíra	-20,32	-48,30	516	25,6	25,8	25,4	23,8	20,5	19,7	19,9	22,1	24,0	25,3	25,3	25,4
Ilha Solteira	-20,40	-51,32	331	26,8	26,6	26,7	25,4	22,3	22,0	20,9	23,7	24,9	26,4	26,5	26,5
Itapetininga	-23,58	-48,05	658	24,4	24,3	24,0	21,7	18,2	17,6	16,8	18,7	19,0	21,7	22,7	24,0
Itapeva	-23,97	-48,90	671	24,6	24,2	24,1	22,4	18,9	17,6	17,8	19,7	19,5	21,9	22,8	23,7
Jaboticabal	-21,25	-48,30	584	25,1	25,2	24,9	23,4	20,3	19,8	19,7	21,3	22,8	24,6	24,3	25,0
Jales	-20,27	-50,57	489	25,9	25,9	25,3	24,0	21,6	21,0	21,0	23,2	23,9	25,4	25,4	25,8
Jaú	-22,27	-48,57	552	24,9	24,9	24,5	23,0	19,8	19,2	18,5	20,1	21,4	23,4	23,9	24,1
José Bonifácio	-21,07	-49,70	452	26,3	26,0	25,7	24,0	21,4	20,5	20,2	23,1	23,9	25,3	25,0	25,9
Jundiaí	-23,20	-46,87	718	24,3	24,1	23,5	22,0	18,8	17,4	17,7	19,1	20,4	22,6	22,5	23,3
Lins	-21,67	-49,77	438	27,0	26,2	26,2	24,9	21,4	20,1	20,1	22,4	23,8	25,0	25,7	26,9
Manduri	-23,07	-49,35	571	24,5	24,4	23,8	22,0	18,9	17,4	16,9	18,7	20,3	22,7	23,1	24,2
Matão	-21,60	-48,37	558	25,3	25,5	25,2	23,5	20,9	19,3	19,9	21,5	22,6	24,3	24,8	25,2
Paranapanema	-22,30	-51,92	406	26,2	25,8	26,1	24,4	20,8	20,2	19,2	22,1	22,2	24,0	24,8	25,6
Mococa	-21,47	-47,01	641	24,9	24,8	24,6	22,6	20,1	19,5	19,9	21,3	22,6	24,4	24,1	24,6
Monte Alegre	-22,68	-46,72	746	23,6	23,6	22,9	21,6	18,1	17,4	17,9	19,0	20,4	22,4	22,7	22,9
Oswaldo Cruz	-21,77	-50,90	479	27,5	26,2	27,1	25,9	22,3	21,6	21,6	24,1	24,1	25,6	26,3	27,2
Palmital	-22,80	-50,20	496	25,0	25,1	25,1	22,9	20,0	19,1	18,9	20,8	22,2	24,1	24,6	25,2
Pariquera Açu	-24,72	-47,87	53	25,9	25,6	25,1	22,8	20,1	18,6	18,0	19,2	19,9	22,2	23,7	25,0
Paulínia	-22,77	-47,15	602	25,4	24,9	24,9	22,6	19,9	18,4	18,4	20,3	21,9	23,9	23,6	24,9
Pedrinhas Paulista	-22,82	-50,77	350	26,1	25,8	25,8	23,9	20,4	19,5	18,8	21,1	22,2	24,0	25,0	25,7
Pindorama	-21,22	-48,93	583	24,8	24,9	24,7	22,9	20,1	19,8	19,6	21,8	22,5	24,3	24,1	24,4
Piracicaba	-22,73	-47,65	535	24,9	24,9	24,4	22,4	19,8	18,0	17,4	19,3	20,8	22,9	23,6	24,2
Rancharia	-22,23	-50,90	522	25,9	25,8	25,9	24,3	21,1	20,1	19,7	23,4	22,9	24,7	24,9	26,2
Registro	-24,48	-47,85	8	26,6	25,9	25,5	23,9	20,8	18,8	18,2	19,8	20,0	22,5	24,0	25,7
Ribeirão Preto	-21,17	-47,80	561	24,6	24,9	24,5	22,9	20,3	19,3	19,4	21,3	23,0	24,6	24,0	24,4
São Simão	-20,80	-49,37	512	24,5	24,7	25,0	23,1	20,4	19,3	19,3	21,8	23,7	23,5	23,9	24,3
SJ Rio Preto	-21,48	-47,55	666	27,2	26,7	26,9	25,5	22,1	20,4	21,0	23,4	25,0	26,6	26,4	26,6
Sorocaba	-23,50	-47,45	562	25,5	24,7	24,7	23,2	19,8	18,7	18,5	20,9	21,3	23,4	24,0	24,2
SJ Rio Pardo	-23,50	-46,61	756	24,3	24,5	25,2	22,9	19,3	18,7	18,1	19,8	21,3	23,5	23,3	24,1
Taquarituba	-23,53	-49,25	605	25,5	24,9	25,0	22,5	18,9	17,6	17,2	19,5	20,6	22,6	23,9	24,8
Tatuí	-23,37	-47,87	552	25,7	24,8	24,6	22,2	19,1	17,4	17,2	19,4	20,6	23,5	23,6	24,4
Tupi Paulista	-21,38	-51,58	388	26,9	26,7	26,3	24,6	21,6	20,8	20,5	22,8	23,1	25,6	26,3	26,3
Tarumã	-22,77	-50,52	476	25,6	25,7	25,5	23,2	19,3	18,8	18,9	20,1	22,2	24,3	24,8	25,6
Votuporanga	-20,42	-49,97	515	26,3	25,9	25,7	24,3	21,4	20,3	21,1	22,5	24,2	25,8	25,6	26,0

3.2 Balanço hídrico climatológico

Para a caracterização climática e obtenção dos mapas de clima referentes ao Estado de São Paulo, foi calculado o balanço hídrico climatológico normal (BHC) na escala mensal, de acordo com o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), empregando-se as planilhas eletrônicas. Essas planilhas foram programadas utilizando-se as equações referentes às entradas e saídas de água do sistema solo

– planta. Para tanto, cada coluna continha as seguintes variáveis, em nível mensal: precipitação normal (P, mm); temperatura média do ar (Tm, °C); evapotranspiração de referência (ETo, mm); evapotranspiração real (ETR, mm); Armazenamento de água atual e final (ARM e ARMf, mm); deficiência hídrica (DEF, mm) e excedente hídrico (EXC, mm). A partir desses valores, fez-se o somatório, no caso das variáveis P, ETo, ETR, DEF e EXC com a finalidade de se obter o valor anual normal para cada uma dessas componentes. No caso da variável Tm, aplicou-se a média aritmética para a obtenção dos valores médios ao longo do ano. Nessas planilhas foram utilizados três valores de capacidade de água disponível (CAD), as quais obedeceram, basicamente, ao tipo de solo (PRADO, 2008).

Para a determinação dos principais tipos de solo no Estado de São Paulo onde é cultivada a cultura da cana-de-açúcar adotou-se como referência o mapa pedológico do Estado (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2011). Tendo como base esse mapa e os critérios apresentados por Prado (2008), os seguintes valores de CAD foram adotados para cada tipo de solo: Argissolo (50 mm); Latossolo (60 mm); Nitossolo (90 mm).

Para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) foi utilizado o método de Priestley e Taylor (PEREIRA et al., 1997) o qual é apresentado na Equação 2:

$$ETo = 1,26 \times W \times \frac{(Rn - G)}{2,45} \times NDD \quad (2)$$

em que: ETo é a evapotranspiração de referência (mm decêndio⁻¹); W é o coeficiente de ponderação dependente da temperatura; 2,45 é o fator de conversão de calor latente disponível em massa de água evaporada em cada decêndio (MJ kg⁻¹); Rn o saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹); G o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹) e NDD o número de dias do decêndio.

Para o cálculo de W, foram utilizadas duas equações, as quais foram propostas por Wilson e Rouse (1972). Essas equações correspondem aos períodos em que a temperatura do ar apresentou valores, na primeira situação, inferiores a 16°C (Wa) e na segunda situação, valores entre 16 e 32°C (Wb):

$$Wa = 0,407 + 0,0145 \times Tar \quad (3)$$

$$Wb = 0,483 + 0,01 \times Tar \quad (4)$$

em que: W é o coeficiente de ponderação que é dependente da temperatura do ar; e Tar a temperatura média do ar em cada período considerado.

Para a estimativa do R_n e do G , seguiu-se os procedimentos recomendados no Boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998).

3.3 Processamento dos dados geográficos para a elaboração dos mapas

Para o processamento das imagens empregadas neste trabalho, foi utilizado o SIG (Sistema de Informações Geográficas) ArcGis 9.3, sendo que a partir desse *software* foram efetuadas todas as etapas necessárias para a obtenção tanto dos mapas relativos às coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude), como aos mapas de clima, de produtividade (potencial, atingível e real) e de eficiência climática para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.

Primeiramente foi acessado o site da Embrapa Monitoramento por Satélite, no qual estão disponibilizadas imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) em formato GEOTIFF (16 bits) referentes ao modelo digital de elevação (MDE) do terreno de todos os Estados do Brasil (EMBRAPA, 2011) e foi selecionada cada figura (imagem “simples”) do mapa completo do Estado de São Paulo. A partir disso e para a obtenção de uma imagem “composta” que representasse o Estado de São Paulo como um todo, utilizou-se a ferramenta “mosaic”, a qual é acessada após a seguinte sequência de comandos (*ArcToolBox - Data Management Tools – Raster – Mosaic*). Essa imagem tem uma resolução espacial (grid) de 90 metros e está georreferenciada originalmente no Sistema de Coordenadas Geográficas e o sistema de projeção é o DATUM WGS 84.

Para a obtenção dos “layers” de latitude e longitude a partir da imagem SRTM foram utilizadas equações específicas, as quais o software já reconhece e são apresentadas a seguir:

$$\text{Latitude} = \$\$YMAP \quad (5)$$

$$\text{Longitude} = \$\$XMAP \quad (6)$$

Para a obtenção de cada “pixel” foi realizado o cruzamento dos layers correspondentes às coordenadas geográficas latitude e longitude, com os quais foi possível gerar um “grid” composto por 6639 linhas e 10739 colunas. As coordenadas geográficas (latitude e longitude) referentes a cada posto de coleta de dados (PCD)

de precipitação da ANA foram admitidas conforme está publicado no site da “HidroWeb”. Para a extração da altitude de cada pixel, primeiramente foi montada uma planilha de dados em que foram plotadas as coordenadas geográficas de cada PCD. No SIG, essa planilha, contendo os dados de latitude e longitude, foi carregada por meio da ferramenta *Tools - Add XY Data*. Após a realização desses dois comandos, os dados inseridos foram transformados em um *layer* para que fosse possível extrair a altitude referente ao ponto central de cada pixel formado pela intersecção das linhas e colunas representativas às coordenadas geográficas.

Essa extração foi possível utilizando-se o modelo digital de elevação gerado e por meio da sequência de comandos no SIG (*Spatial Analyst Tools – Extractions – Extract Values to Point*) permitindo obter a altitude de cada PCD, a qual posteriormente foi utilizada como variável independente nas equações de regressão linear múltipla tanto para a geração dos mapas das variáveis climáticas, como das componentes do Balanço Hídrico Climatológico e das produtividades potencial e atingível da cultura da cana-de-açúcar. A localização geográfica de cada PCD é apresentada na Figura 2.

Para a espacialização das variáveis climáticas, T_m , n , P e ET_o , foram empregados os modelos lineares gerados pela correlação entre essas variáveis e as coordenadas geográficas (latitude e longitude) e a altitude, proveniente do modelo de elevação digital. Já no caso da espacialização das variáveis DEF e EXC, a precipitação média anual também foi considerada como variável independente, juntamente com as coordenadas geográficas e altitude.

A seguir é apresentada a Equação 7, que foi utilizada para a espacialização dos componentes do balanço hídrico climatológico, conforme descrito anteriormente:

$$\text{CompBHC} = a + b\phi + c\lambda + d\xi + e\phi\lambda + f\phi\xi + g\lambda\xi + h\phi^2 + i\lambda^2 + j\xi^2 + kP + \varepsilon \quad (7)$$

em que: CompBHC representa cada componente do BHC (DEF e EXC); ϕ é a latitude (em graus e décimos negativos); λ a longitude (em graus e décimos negativos); ξ a altitude do local (em metros); a é o coeficiente linear da equação de regressão; b , c , d , e , f , g , h , i , j e k são os coeficientes angulares da equação de regressão múltipla; P é a precipitação anual média do local; e ε o erro associado às estimativas.

Os mapas de latitude e longitude, juntamente com o de altitude (obtido da imagem SRTM), foram empregados na confecção dos mapas das variáveis climáticas por meio da álgebra de mapas, conforme sugerido por Yamada (2011).

Por meio da ferramenta *Spatial Analyst – Options* e *Spatial Analyst – Raster Calculator* transformaram-se as equações de LAT e LONG em mapas. A planilha das estações contendo coordenadas geográficas, as variáveis climáticas e os desvios foram espacializadas no ArcGis 9.3 por meio da ferramenta *Tools – Add XY data*. Posteriormente, transformou-se a planilha em arquivo *shapefile* por meio do *Data – Export data* para elaboração dos mapas.

Para cada variável realizou-se a álgebra de mapas. A álgebra de mapas foi realizada por meio da ferramenta *Spatial Analyst – Raster Calculator*, empregando-se os mapas de latitude, longitude, altitude e os dados de cada estação para as respectivas variáveis.

3.4 Simulação dos ciclos e das épocas de plantio da cana-de-açúcar

Para realizar a simulação das épocas de plantio durante os 30 ciclos (1973 – 2003) considerados neste estudo foram admitidas as seguintes condições:

- Cana Planta (CP): cana planta de fevereiro (18 meses), cana planta de março (18 meses), cana planta de inverno (15 meses), cana planta de setembro (12 meses) e cana planta de outubro (12 meses).
- Cana Soca (CS): no caso dos ciclos representativos da “cana soca” (12 meses) foram consideradas três épocas de colheita em cada ano, ou seja: cana soca precoce, cujo início do ciclo foi simulado em 1 de maio; cana soca média, cujo início do ciclo foi simulado em 1 de julho; cana soca tardia, cujo início do ciclo foi simulado em 1 outubro. As produtividades relativas às “canas-soca” foram admitidas como sendo a média de 5 cortes.

A Tabela 4 ilustra como se deram os ciclos de simulação das canas planta e soca, para cada uma das localidades analisadas.

Tabela 4 - Épocas de plantio e colheita simuladas para os oito ciclos de cana-de-açúcar considerados, sendo que “CP” representam as canas “planta” e CS representam as canas “soca”

Época de Plantio (ou maturação)	Meses do ano											
	j	f	m	a	m	j	j	a	s	o	n	d
CP Fev												
CP Mar												
CP Julho (inverno)												
CP Set												
CP Out												
CS Precoce												
CS Media												
CS Tardia												

A partir da tabela acima é possível visualizar que as épocas em que geralmente é realizada a operação de colheita, compreenderam os períodos entre praticamente fim de abril até o início de outubro, ou seja, nos meses em que há um déficit hídrico normal acentuado na maioria das regiões canavieiras do Estado de São Paulo e, por isso, sendo as épocas mais apropriadas para a realização dessa operação agrícola.

3.5 Estimativa da produtividade potencial (PP) e da produtividade atingível (PA) da cana-de-açúcar

Para a simulação das épocas de plantio e colheita da cultura foram admitidas oito épocas de plantio/ciclo, ou seja, cinco épocas representativas ao plantio de “cana planta” e três épocas de ciclo para a “cana soca”. Sendo assim, foi realizada a ponderação admitindo-se que 20% da área de produção correspondem à “cana planta” e 80% à “cana soca”. Sendo assim, considerou-se os valores de produtividade como sendo a média de cinco cortes, e posteriormente, fez-se a renovação do canavial. Com relação à cana planta, as cinco épocas de plantio foram discriminadas nas seguintes proporções: plantio em fevereiro (5% da área); plantio em março (3% da área); plantio em setembro (3% da área); plantio em outubro (5% da área); plantio no inverno (4% da área). Já no caso da “cana soca”, a discriminação foi realizada como sendo 25% da área cultivada com cana soca de ciclo “precoce”; 35% da área cultivada com cana soca de ciclo “médio” e 20% da área cultivada com cana soca de ciclo “tardio”.

A Equação 8, apresentada a seguir, apresenta como foi realizada a ponderação para o cálculo da produtividade final (P_{Pond}) tanto para a produtividade potencial como para a produtividade atingível da cultura:

$$P_{pond} = 0,05 \times P_{plF} + 0,03 \times P_{plM} + 0,03 \times P_{plS} + 0,05 \times P_{plO} + 0,04 \times P_{plI} + 0,25 \times P_{Spr} + 0,35 \times P_{Smd} + 0,20 \times P_{Std} \quad (8)$$

em que: P_{pond} é a produtividade ponderada da cultura; P_{plF} , P_{plM} , P_{plS} , P_{plO} e P_{plI} são as produtividades da cana planta com ciclos iniciados em fevereiro, março, setembro, outubro e inverno (julho), respectivamente; P_{Spr} , P_{Smd} e P_{Std} são as produtividades da cana soca com ciclos iniciados em maio (cana soca precoce), agosto (cana soca média) e outubro (cana soca tardia), respectivamente.

Além disso, foi feita a conversão dos coeficientes de ponderação para obter os mapas referentes apenas à produtividade da cana planta e da cana soca. Sendo assim, abaixo são apresentadas as equações de ponderação para a obtenção da produtividade da cana planta (P_{planta}) e da cana soca (P_{soca}):

$$P_{planta} = 0,25 \times P_{fev} + 0,15 \times P_{mar} + 0,15 \times P_{set} + 0,25 \times P_{out} + 0,2 \times P_{inv} \quad (9)$$

em que: P_{planta} é a produtividade (potencial ou atingível) ponderada da cana planta; P_{fev} , P_{mar} , P_{set} , P_{out} e P_{inv} são as produtividades calculadas cujo ciclo da cultura foi simulado com início nos meses de fevereiro, março, setembro, outubro e inverno (julho).

$$P_{soca} = 0,3125 \times P_{prec} + 0,4375 \times P_{md} + 0,25 \times P_{td} \quad (10)$$

em que: P_{soca} é a produtividade da cana soca ponderada pelas três épocas de cultivo (precoce, média e tardia); P_{prec} , P_{md} e P_{td} são as produtividades (potencial e atingível) dos ciclos de cana soca precoce, média e tardia, respectivamente.

3.5.1 Estimativa da produtividade potencial (PP) da cultura da cana-de-açúcar

Primeiramente, é importante salientar que não foi possível obter a produtividade potencial (PP) em cada ano das séries históricas, em razão da indisponibilidade dos dados de temperatura média (T_m) e insolação (n) para cada ano do período estudado. Sendo assim, os valores de produtividade potencial da cultura da cana foram determinados para as condições médias de cada localidade, determinadas por meio dos modelos lineares na escala mensal. Isso resultou em

um mesmo valor de PP para toda a série de anos, havendo variação apenas entre as diferentes épocas de plantio e dos ciclos da cana soca.

Para a determinação da produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar, foi utilizado o modelo agrometeorológico da Zona Agroecológica (Modelo FAO), o qual considera as variáveis Tm, N e n como as entradas do modelo. Para a estruturação deste modelo e, posteriormente, obtenção da PP em cada ciclo da cultura foram programadas planilhas eletrônicas de cálculo, na escala decendial, nas quais foram inseridas as equações representativas ao modelo agrometeorológico utilizado. A seguir é apresentado o modelo empregado para a estimativa da PP:

$$PP = \sum_{i=1}^m (PPBp_i \times c_{iaf} \times c_{resp} \times c_{colh} \times c_{um}) \quad (11)$$

em que: PP é a produtividade potencial final da cultura (kg MS ha⁻¹); o índice i = 1 a m; m representa os decêndios do ciclo; PPBp representa a produtividade potencial bruta padrão de matéria seca para uma cultura hipotética com IAF = 5 (kg MS ha⁻¹ dia⁻¹); c_{iaf} é o coeficiente para correção do índice de área foliar; c_{resp} o coeficiente para correção da respiração de manutenção da cultura; c_{colh} o coeficiente relativo à parte colhida (colmos); e c_{um} o coeficiente para considerar a umidade aos colmos.

Visando à diferenciação dos ciclos admitidos neste trabalho, principalmente com relação aos ciclos de cana planta de 12 meses e cana soca, fez-se essa distinção pelo índice de área foliar (IAF), ou seja, a cana planta de 12 meses tendo um IAF máximo maior do que o IAF máximo da cana soca, embora ambas tenham sido simuladas com a mesma duração em dias do ciclo. Sendo assim, os valores de IAF utilizados para cada ciclo de desenvolvimento da cana planta (18 meses, 15 meses e 12 meses) e da cana soca (cana planta e cana soca) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores do índice de área foliar (IAF) considerados em cada fase fenológica da cultura da cana-de-açúcar, considerando-se os diferentes ciclos de cana planta e cana soca

Fase Fenológica	Cana Planta			Cana Soca
	18 meses	15 meses	12 meses	12 meses
25% coberto	2,5	2,0	2,0	2,0
25 - 50%	3,0	2,5	2,5	2,5
50 - 75%	4,5	3,5	3,0	3,0
75 - 100%	5,0	4,0	3,5	3,5
Máximo Cresc	6,0	5,0	4,5	4,0
Senescência	5,0	4,0	4,0	3,5
Amadurecimento	4,5	3,5	3,5	3,0
Número de Dias	540	450	365	365

Fonte: Boletim da FAO, n°33, 1994.

A variável de entrada do modelo “PPBp” representa a produtividade potencial bruta de uma cultura hipotética padrão. Para o cálculo desse componente do modelo agrometeorológico, realizou-se a soma das duas condições que representam os dias em que o céu está limpo (PPBc) e os dias em que o céu apresenta nebulosidade (PPBn). Essas duas componentes foram estimadas conforme as equações abaixo:

$$PPBc = (107,2 + 8,604 \times Qo) \times \frac{n}{N} \times cTc \quad (12)$$

$$PPBn = (31,7 + 5,234 \times Qo) \times \left(1 - \frac{n}{N}\right) \times cTn \quad (13)$$

em que: PPBc e PPBn representam a produtividade potencial bruta em dias com céu sem nebulosidade e com nebulosidade, respectivamente ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); n é o número de horas efetivas com brilho solar (horas dia^{-1}); N o fotoperíodo diário (horas dia^{-1}); Qo a irradiância solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); cTc e cTn representam os fatores de correção para a temperatura e ciclo metabólico da espécie (C4) nos dias de céu limpo e céu nublado, respectivamente.

O coeficiente de correção da PPBp relativo ao índice de área foliar da cultura (c_{iaf}) foi calculado utilizando-se a equação descrita abaixo:

$$c_{iaf} = 0,0093 + 0,185 \times IAF_{\max} - 0,0175 \times IAF_{\max}^2 \quad (IAF_{\max} \geq 5; c_{iaf} = 0,5) \quad (14)$$

em que: c_{iaf} é o coeficiente de correção para a área foliar; $IAF_{\max}$ representa o valor máximo de IAF no decêndio considerado.

O coeficiente utilizado para a correção da PPBp em relação à respiração de manutenção da cultura (c_{resp}) é uma função da temperatura média do ar. Assim sendo, há duas condições térmicas que elegem o uso desse coeficiente: quando a temperatura média do ar é maior ou igual a 20°C, admite-se $c_{resp} = 0,5$; e quando a temperatura do ar for menor que 20°C admite-se $c_{resp} = 0,6$.

O coeficiente de colheita (c_{colh}) é responsável pela conversão da matéria seca bruta colhida em matéria seca útil. Sendo assim, admitiu-se que os colmos, produto de interesse no caso da cana-de-açúcar, representam 80% da massa total da planta (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

Da mesma maneira, a PPBp calculada apenas confere uma aproximação da massa seca produzida pela cultura ao longo do seu ciclo de cultivo. Sendo assim, deve-se considerar no modelo agrometeorológico um coeficiente com a finalidade de simular a umidade ao produto a ser colhido. Nesse caso, a equação utilizada para a simulação da adição de umidade aos colmos é apresentada a seguir:

$$c_{um} = [1 - 0,01 \times U(\%)]^{-1} \quad (15)$$

em que: c_{um} é o coeficiente para contabilizar a quantidade de água presente nos colmos; $U(\%)$ representa a umidade dos colmos, em percentagem.

3.5.2 Estimativa da produtividade atingível (PA) da cultura da cana-de-açúcar

Para essa etapa, considerou-se que a quebra relativa de produtividade ($1 - PA/PP$) tem relação direta com o déficit hídrico relativo ($1 - ETr/ETm$). A partir disso, Doorenbos e Kassam (1994) propuseram um modelo que relaciona essas duas componentes para a estimativa da produtividade atingível (PA) de uma cultura. Dessa maneira, foi possível calcular a produtividade atingível da cana-de-açúcar apenas conhecendo-se a produtividade potencial (PP), o coeficiente de resposta da cultura ao déficit hídrico (k_y), o qual varia de acordo com as fases fenológicas, e o déficit hídrico relativo, proveniente do balanço hídrico da cultura. A Tabela 6 apresenta os valores de k_y utilizados durante as diferentes fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar, segundo Doorenbos e Kassam (1994).

Tabela 6 - Coeficientes de resposta ao déficit hídrico (k_y) empregados na estimativa da produtividade atingível (PA) da cultura da cana-de-açúcar

Fase Fenológica	k_y
25% coberto	0,75
25 - 50%	0,75
50 - 75%	0,5
75 - 100%	0,5
Máximo Cresc	0,5
Senescência	0,5
Amadurecimento	0,1

Fonte: Boletim da FAO, nº33, 1994.

Assim sendo, a equação utilizada para a estimativa da produtividade atingível (PA) está descrita a seguir:

$$PA_n = \prod_{i=1}^7 \left[PA_{n-1} \times \left(1 - k_{y_i} \times \left(1 - \frac{ETr}{ETm} \right)_i \right) \right] \quad (16)$$

em que: PA_n é a produtividade atingível ($t\ ha^{-1}$); os valores de $i = 1$ a 7 representam os estádios fenológicos considerados durante o ciclo da cultura; PA_{n-1} é a produtividade atingível do estágio fenológico anterior ($t\ ha^{-1}$), e no caso da primeira fase fenológica $PA_{n-1} = PP$; k_y é o coeficiente de resposta ao déficit hídrico da cultura em cada fase fenológica; ETr é a evapotranspiração real da cultura (mm); ETm é a evapotranspiração máxima da cultura (mm).

Após os cálculos da produtividade potencial (PP), fez-se a penalização desta por meio do déficit hídrico relativo ($1 - ETr/ETm$), em cada estágio fenológico de desenvolvimento simulado. A evapotranspiração máxima da cultura (ETm) foi obtida por meio do produto entre os valores de evapotranspiração de referência (ETo), estimada pelo método de Priestley e Taylor em cada decêndio do ciclo da cultura considerado, e o coeficiente de cultivo (k_c), cujos valores estão apresentados na Tabela 7. Dessa maneira, foi possível representar o efeito do déficit hídrico na redução da produtividade.

Tabela 7 - Valores do coeficiente de cultura (kc)

Estádio Fenológico	kc
25% coberto	0,50
25-50%	0,80
50-75%	1,00
75-100%	1,10
Máximo cresc.	1,20
Senescência	0,95
Amadurecimento	0,65

Fonte: Boletim da FAO, nº33, 1994

3.5.3 Fator de penalização da produtividade potencial e produtividade atingível pela ocorrência de baixas temperaturas: estresse pelo frio

Com o propósito da obtenção de valores mais consistentes da produtividade potencial e produtividade atingível da cana-de-açúcar foi introduzido no modelo agrometeorológico um fator correspondente ao efeito redutor da produtividade pelo efeito do frio. Isso se mostrou necessário já que a ocorrência de valores muito baixos de temperatura do ar limitam o crescimento dos canaviais, podendo em casos extremos, como em eventos de geada, reduzir drasticamente a produtividade. Sendo assim, para contabilizar tal efeito, foi elaborado, a partir da equação de regressão linear múltipla (Equação 17) proposta por Astolpho et al. (2005), um mapa de probabilidade de ocorrência de temperatura mínima absoluta do ar medida no abrigo meteorológico menor do que 2°C, valor considerado como limiar para a ocorrência de geadas.

$$P(\%) = -374,45 - 10,848\phi - 2,676\lambda + 0,0616\xi \quad (17)$$

em que: P(%) representa a probabilidade de ocorrência de temperatura mínima absoluta do ar abaixo de 2°C; ϕ , λ e ξ representam a latitude, longitude e altitude de cada posto de coleta de dados em graus e décimos, respectivamente.

Na ausência de estudos mais aprofundados sobre o efeito da ocorrência de geadas principalmente na cultura da cana-de-açúcar, foi proposto um fator de penalização da produtividade da cultura pelo frio, sendo esses relativos a cada probabilidade de ocorrência de geada. Por meio dessa metodologia, foi possível a obtenção de mapas, tanto de produtividade potencial como produtividade atingível

da cultura da cana-de-açúcar, mais coerentes com a realidade observada no campo. Esses valores de penalização estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Probabilidades de ocorrência de geada (P(%)) e seus respectivos fatores de penalização “fgeada” da produtividade potencial e atingível

fgeada	P(%)
1,00	0 - 20
0,98	20,1 - 30
0,95	30,1 - 40
0,90	40,1 - 50
0,80	50,1 - 60
0,65	60,1 - 70
0,45	70,1 - 80
0,20	> 80

Com relação à inserção do fator geada, a equação utilizada para a estimativa da produtividade potencial e produtividade atingível da cultura estão apresentadas logo abaixo:

$$PP = f(\text{geada}) \times \left[\sum_{i=1}^m (PPBp \times c_{iaf} \times c_{resp} \times c_{colh} \times c_{um}) \right] \quad (18)$$

$$PA_n = f(\text{geada}) \times \left\{ \prod_{i=1}^7 PA_{n-1} \left[1 - ky \times \left(1 - \frac{ETr}{ETm} \right) \right] \right\} \quad (19)$$

3.6 Estimativa da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar

Para a estimativa da eficiência climática (η) foi realizado o quociente entre os valores provenientes do cálculo de estimativa da produtividade atingível (PA) para cada ano de simulação e ciclo de cultivo (dezoito meses, quinze meses e doze meses) e de manejo da cultura (cana planta e cana soca) e da produtividade potencial (PP). A eq. (21) apresenta a maneira com que foi determinada a eficiência climática para a cana-de-açúcar:

$$\eta = \frac{PA}{PP} \quad (20)$$

em que: η é a eficiência climática; PA a produtividade atingível ($t \text{ ha}^{-1}$); PP a produtividade potencial da cultura ($t \text{ ha}^{-1}$).

3.7 Mapeamento da produtividade potencial, produtividade atingível e da eficiência climática

Primeiramente para que fosse possível realizar a álgebra de mapas e gerar os mapas de produtividade potencial da cultura relativos a cada época de plantio admitida, utilizou-se uma equação de regressão linear múltipla a qual teve como variáveis independentes apenas as coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) de cada local, já que, conceitualmente, a PP não sofre efeito do déficit hídrico, estresses ambientais ou ocorrência de pragas e doenças. Sendo assim, a equação de regressão linear múltipla utilizada para estimar a PP em cada pixel representativo do Estado de São Paulo foi:

$$PP = a + b\phi + c\lambda + d\xi + e\phi\lambda + f\phi\xi + g\lambda\xi + h\phi^2 + i\lambda^2 + j\xi^2 + \varepsilon \quad (21)$$

em que: PP é a produtividade potencial da cultura ($t\ ha^{-1}$); ϕ a latitude (em graus e décimos negativos); λ a longitude (em graus e décimos negativos); ξ a altitude do local (em metros); a representa a intersecção com o eixo “y”, ou seja, o coeficiente linear da equação de regressão; b , c , d , e , f , g , h , i e j representam os coeficientes angulares de ajuste da equação de regressão múltipla; ε é o erro associado às estimativas.

Para a estimativa dos coeficientes da equação de regressão para a espacialização da produtividade atingível da cultura, realizou-se um procedimento semelhante à estimativa da equação de regressão múltipla para estimativa da PP, porém foi considerado como variável independente, além das coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude), a deficiência hídrica anual normal e a produtividade potencial relativa a cada local. A Equação 22 representa o modelo linear empregado na espacialização dessa variável.

$$PA = a + b\phi + c\lambda + d\xi + e\phi\lambda + f\phi\xi + g\lambda\xi + h\phi^2 + i\lambda^2 + j\xi^2 + kDa + lPP + \varepsilon \quad (22)$$

em que: PA é a produtividade atingível da cultura ($t\ ha^{-1}$); ϕ é a latitude (em graus e décimos negativos); λ a longitude (em graus e décimos negativos); ξ a altitude do local (em metros); a representa a intersecção com o eixo “y”, ou seja, o coeficiente linear da equação de regressão; b , c , d , e , f , g , h , i , j , k e l representam os coeficientes angulares da equação de regressão múltipla; Da é o déficit hídrico normal anual (mm); PP a produtividade potencial da cultura ($t\ ha^{-1}$); o ε representa o erro associado às estimativas. Após a obtenção dos coeficientes da equação de

regressão, foram estimados os valores de PP e PA em uma coluna da planilha eletrônica de cálculo a qual estava localizada logo após da coluna a qual continha os valores estimados pelo modelo agrometeorológico. Sequencialmente, os valores de produtividade potencial e atingível foram obtidos por meio da utilização da equação de regressão. Em seguida, foi realizada a subtração entre os valores estimados pelo modelo e os valores estimados pela equação de regressão constituindo-se, portanto, o erro (ϵ). A seguir, estão descritas as etapas para a elaboração dos mapas de produtividade potencial, produtividade atingível e eficiência climática:

Primeiramente, no SIG foram carregados e selecionados os “layers” correspondentes às coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) por meio da ferramenta *Add Data*. Após a realização dessa tarefa, na barra de ferramentas foi realizada a seguinte sequência de comandos com a finalidade de definir o tamanho da célula (cell size) com as quais deveriam ser realizadas as análises de espacialização: *Spatial Analyst – Options – General* – na guia *Analyst Mask* (selecionar) – *Altitude* – na guia *Extent* (selecionar) – *Altitude* – na guia *Cell Size* (selecionar) – *Same as Layer “Altitude”* – ok. Novamente se executou a seguinte sequência de comandos: *Spatial Analyst – Options – General* – na guia *Analyst Mask* (selecionar) – *Altitude* – na guia *Extent* (selecionar) – *Intersection of inputs* – ok.

Dessa maneira, estava configurado o SIG para realizar a álgebra de mapas, a qual foi possível por meio da sequência de comandos: *Spatial Analyst - Raster calculator*. no qual foram considerados os coeficientes das equações de regressão e os “layers de latitude, longitude e altitude. No caso da confecção dos mapas correspondentes à produtividade atingível relativa a cada época de plantio e suas respectivas ponderações (cana planta, cana planta ponderada, cana soca, cana soca ponderada e cana ponderada geral), foi adicionado o “layer” correspondente à produtividade potencial respectiva, juntamente com o “layer” correspondente ao déficit hídrico anual. A partir disso, a mesma sequência de comandos adotada para a espacialização da produtividade potencial foi realizada para a espacialização da produtividade atingível da cana-de-açúcar.

No caso da espacialização da eficiência climática, o procedimento foi bastante simplificado em relação aos procedimentos de obtenção dos layers respectivos da produtividade potencial e produtividade atingível da cultura. Pelo próprio conceito de eficiência climática (η), ou seja, a quebra da produtividade potencial pelo efeito do

clima, mais especificamente pelo déficit hídrico, foi obtido o mapa dessa eficiência pela simples razão obtida pela álgebra de mapas: quociente entre o “*layer*” de produtividade atingível e o “*layer*” de produtividade potencial para cada ciclo admitido neste trabalho.

3.8 Confecção dos mapas finais das variáveis climáticas, componentes do balanço hídrico, produtividade potencial e atingível

Para a obtenção dos mapas finais foi realizado o seguinte procedimento: após a obtenção dos mapas gerados pelas equações de regressão linear múltipla tanto das variáveis climáticas e do balanço hídrico climatológico como das produtividades potencial e atingível, foi gerado o “mapa de erros” para cada um desses atributos o qual foi somado ao mapa gerado pelo método da regressão, resultando no mapa final de cada variável. Esses mapas foram obtidos, por exemplo, no caso das produtividades, pela diferença entre o valor calculado pelo modelo agrometeorológico utilizado e o valor estimado pela equação de regressão linear múltipla. Essa mesma metodologia foi aplicada para a estimativa do erro das variáveis climáticas e dos componentes do balanço hídrico climatológico. Na Figura 3 é apresentado um exemplo do procedimento utilizado na confecção dos mapas finais, semelhante ao procedimento adotado por Yamada (2011).

Figura 3 - Representação esquemática do procedimento de álgebra de mapas para a obtenção dos mapas finais dos atributos do clima, do balanço hídrico e das produtividades potencial e atingível da cana-de-açúcar, para o estado de São Paulo

3.9 Análise do desempenho do modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade atingível da cana-de-açúcar

Para a avaliação do desempenho do modelo agrometeorológico utilizado foram coletados dados de produtividade real média de 20 anos (1990 – 2009) da cultura da cana-de-açúcar, para as principais regiões produtoras do Estado de São Paulo, por meio do acesso ao banco de dados do IBGE (IBGE, 2011). Posteriormente, fez uma filtragem dos dados para eliminação de valores discrepantes, admitindo-se diferenças de no máximo 10% entre os dados de produtividade real observada e produtividade atingível. Esse procedimento foi adotado já que no modelo agrometeorológico utilizado não é possível se considerar os efeitos relativos ao manejo da cultura. Após a organização e seleção dos dados de produtividade do

IBGE, procedeu-se a análise da performance do modelo agrometeorológico, considerando-se duas situações:

- a) Comparação entre os dados do IBGE e os valores de produtividade atingível sem o efeito da penalização pela ocorrência de estresse térmico.
- b) Comparação entre os dados do IBGE e os valores de produtividade atingível penalizados pelo efeito do estresse causado pelas baixas temperaturas do ar.

A partir desses valores observados e estimados pelo modelo agrometeorológico foram calculados os seguintes coeficientes estatísticos de desempenho: coeficiente de determinação (R^2), o qual representa o grau de dependência da variável predita pela variável preditora, ou seja, indica a precisão do modelo; coeficiente “d” de Willmott (1985), o qual representa a distância relativa dos valores estimados da reta 1:1, ou seja, indica a acurácia do modelo e é calculado de acordo com a eq. (23); valor “C”, de Camargo e Sentelhas (1997), o qual representa o índice de concordância ou desempenho do modelo e é calculado por meio da eq. (24); RMSE (do inglês, *root mean square error*), o qual representa a raiz quadrada do erro médio e é calculado por meio da eq. (25).

$$d = 1 - \frac{\sum (PA - PR)^2}{\sum (|PA - \overline{PR}| + |PR - \overline{PR}|)^2} \quad (23)$$

em que: PA é a produtividade atingível da cultura; PR a produtividade real da cultura; e $\overline{PR}$ a produtividade real média da cultura durante todos anos avaliados.

$$C = r \times d \quad (24)$$

em que: r é o coeficiente de correlação de Pearson; e d o coeficiente de Willmott.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (PA - PR)^2}{N}} \quad (25)$$

em que: PA e PR são, respectivamente, a produtividade atingível e a produtividade real; N é o número de amostras.

3.10 Análise e distribuições de freqüências da produtividade atingível dos principais municípios canavieiros do Estado de São Paulo

Foram escolhidos alguns municípios tradicionais produtores de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo (Araçatuba, Assis, Guaíra, Piracicaba, Ribeirão Preto e São José do Rio Preto) para a realização de um estudo sobre a distribuição de frequência relativa e frequência acumulada referente aos 30 anos em que foi calculada a produtividade atingível.

O propósito desta etapa do trabalho foi identificar nessas regiões quais os valores de produtividade atingível que ocorrem em cada região do Estado de São Paulo, de acordo com as distribuições de frequência, não apresentando apenas os valores médios calculados para cada região. Além disso, julga-se importante essa etapa, já que é sabido que fenômenos meteorológicos adversos tem grande impacto na agricultura, principalmente com relação ao excesso de chuvas e ao déficit hídrico, ambos acarretando queda de produtividade das culturas. Para a realização das distribuições de frequência, foi utilizada a relação em que o número de classes pode ser obtido por meio da seguinte eq. (26) apresentada por Assis (1991):

$$k = \sqrt{n} \quad (26)$$

em que: k representa o número de classes; e n é o número de amostras.

Como o valor de amostras foi representado pelo número de anos analisados, a equação acima resultou em seis (6) classes. Para a realização das distribuições de frequência foi utilizado o programa STATISTICA 8.0, com o qual foi possível obter as distribuições de probabilidade relativa e acumulada. Além disso, para verificar se os dados tinham concordância a uma distribuição normal teórica foi aplicado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS). Ainda assim, pela observação visual da distribuição normal dos resíduos, a qual é representada por um gráfico do tipo “Q-Q-plot”, foi possível admitir a distribuição dos dados obtidos pelo modelo agrometeorológico como sendo proveniente de uma distribuição normal teórica dos dados. Essa técnica apresenta a distribuição dos resíduos em torno de uma reta que representa a distribuição normal teórica de probabilidades.

A partir disso foram obtidos os valores de produtividade atingível e eficiência climática para os níveis de probabilidade (área gerada abaixo da curva de

distribuição das frequências acumuladas) de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 99%, já que o valor teórico representativo a 100% coincide com uma assíntota da curva sigmóide gerada pelo modelo e, por isso, não sendo um valor condizente com o valor representativo à área abaixo da curva de 100%.

3.11 Enfoque climático para a classificação dos ambientes de produção da cana-de-açúcar

Para a obtenção de uma classificação de ambientes de produção com base nas características climáticas, duas propostas serão apresentadas neste trabalho, sendo que a primeira é a distinção dos ambientes com enfoque na produtividade atingível e a segunda proposta é a distinção dos ambientes de produção sob enfoque da eficiência climática. Essas duas condicionantes diferem quanto aos elementos climáticos que são considerados. No caso da classificação desses ambientes com enfoque na eficiência climática, apenas o efeito da água (déficit hídrico) é considerado, já que a eficiência climática é resultado do quociente entre a produtividade atingível e a produtividade potencial. Por outro lado, a classificação dos ambientes com enfoque na produtividade atingível, leva em consideração não apenas o efeito do déficit hídrico, mas também da radiação solar, da temperatura do ar e do fotoperíodo.

De posse na classificação dos ambientes de produção com relação ao clima, foi proposta uma combinação desta com a classificação proposta por Prado (2011) com base em atributos do solo e da produtividade condicionada por ele (Figura 4).

Ambientes de produção de cana-de-açúcar para região Centro-Sul do Brasil Hélio do Prado - 2011				
Ambientes	TCH _s *	IHP	CTC**	Solos
A1	> 100	{ MF M	Alta Alta	GMe,m-3, GXe,m-4 MX, NVef,mf-3. 4; CXe, m-3.3,3.4
A2	96 - 100	{ MF M	Alta Alta, média	GXd, ma PVe,m-6,7 PAe,m-6,7 PV Ae,m-6,7
B1	92 - 96	{ MF M M	Alta Alta ou média Média	GXma,a-3.4 LVm-3,4 PV Ama-3(ø)
B2	88 - 92	{ M	Alta	NVmaf-3,4
C1	84 - 88	{ M M M	Média, alta Média, alta Alta	LA(ø)ma-3, 4 LVdf-3,4 ; PVe-1,2(β) NVef-3, 4
C2	80 - 84	{ M D	Média, alta Média ou alta	LVma-3, 4; CXe, m-3.3,3.4 LVef-3, 4
D1	76 - 80	{ MD M	Média ou alta Média	LVef-3, 4 PVD-3, PVma-3
D2	72 - 76	{ M M	Média Média, alta	LVe,m-1 Rle (μ)
E1	68 - 72	{ M M	Média ou alta Alta	FXe,m-3.3, FXe,m-4.3 LVwf-3,4, LVw-3,4
E2	< 68	{ D MD MF	Baixa Média, alta Alta	RQ, PVA(δ)e, m, d, ma; RL, LVd,ma,a-1 LVwf-3,4, LVw-3,4, RL, FX-3.1, 4.1;3.2,4.2; CXe,m-3.3,3.4; PV Ae,m,d,ma,a (α); GJ

C: Cambissolo; E: Espodossolo; F: Plintossolo; G: Gleissolo; L: Latossolo; P: Argissolo; R: Neossolo; V: Vertissolo; J: Tiomórfico; L: Litólico; M: Melânico; Q: Quartzarênico; R: Regolítico; X: Háptico; A: Amarelo; VA: Vermelho-Amarelo; V: Vermelho.

e: eutrófico; eutroférico; m: mesotrófico; mesotroférico; d: distrófico; df: distroférico; ma: mesoálico; maf: mesoaliférico; a: álico; af: aliférico; w: árico; wf: acriférico.

Textura Latossolos – 1: média tendendo a arenosa; 2: média tendendo a argilosa; 3: argilosa; 4: muito argilosa.

Textura Argissolos – 1: arenosa/média; 2: arenosa/média, abrupto; 3: arenosa/média ou média/argilosa; 4: arenosa/argilosa; 5: arenosa/média, ou arenosa/média ou média/argilosa ou arenosa/média, plintico; 6: média/argilosa; 7: média/argilosa, abrupto.

(^a): horizonte B exposto na superfície; (^b): horizonte B iniciando na profundidade de 30 a 60 cm; (^c): horizonte B iniciando a mais de 60 cm de profundidade; (^d): horizonte B mosqueado; (^e): horizonte A chernozêmico; *: toneladas de cana.ha⁻¹ (média de cinco cortes, sem a influência do manejo avançado); **: CTC: capacidade de troca de cátions do horizonte A.

Figura 4 - Ambientes de produção de cana-de-açúcar para o Centro-Sul do Brasil

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis meteorológicas e componentes do balanço hídrico climatológico

Na Figura 5 é apresentado o mapa do modelo digital de elevação (MDE) do Estado de São Paulo, a partir do qual foi realizada a extração dos valores médios de cada pixel representando a altitude de cada município considerado. Essa cota extraída do MDE (90 x 90 m) foi utilizada para compor as equações lineares de regressão múltipla, visando à estimativa das variáveis climáticas, componentes do BHC, valores de produtividade potencial, produtividade atingível e eficiência climática em cada ciclo considerado da cultura da cana-de-açúcar.

Figura 5 - Mapa do modelo digital de elevação do terreno empregado no presente estudo

Na Figura 6 é apresentado o mapa referente aos municípios produtores de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo durante a safra de 2011.

Figura 6 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no ano safra 2011. Fonte: INPE, 2011; mapa adaptado do Projeto CANASAT.

Por meio da Figura 6 observa-se que basicamente as regiões em que há produção efetiva da cultura da cana-de-açúcar estão situadas geograficamente acima da latitude 24° S. No entanto, os mapas apresentados neste trabalho estão apresentados sem nenhuma restrição ou hachura das regiões onde não há efetiva produção da cultura.

Por meio dos “layers” de latitude e longitude e o “layer” de altitude (modelo digital de elevação), foram obtidas as equações de regressão linear múltiplas para a estimativa das variáveis meteorológicas temperatura máxima e temperatura mínima mensais do ar e insolação diária média mensal. Os coeficientes lineares, os coeficientes angulares e o coeficiente de determinação (R^2) dessas equações são apresentados na Tabela 9, 10 e 11, respectivamente para a Tmax, Tmin e n.

Tabela 9 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa da temperatura máxima média mensal e anual.

Mês	Coeficientes das equações de regressão linear múltipla										
	Intersec	ϕ	λ	ξ	$\phi\lambda$	$\phi\xi$	$\lambda\xi$	ϕ^2	λ^2	ξ^2	R^2
Janeiro	621,782	18,494	16,016	0,0377	0,2693	-0,0012	0,0014	0,1001	0,1100	-4,5E-06	0,92
Fevereiro	619,846	20,061	15,114	0,0346	0,3081	-0,0013	0,0014	0,0902	0,0917	-4,1E-06	0,90
Março	475,451	12,711	12,626	0,0434	0,2320	-0,0009	0,0013	0,0096	0,0837	-4,6E-06	0,90
Abril	522,033	16,945	12,415	0,0384	0,2461	-0,0011	0,0014	0,0774	0,0784	-4,0E-06	0,92
Mai	545,828	19,249	12,234	0,0368	0,2291	-0,0010	0,0013	0,1458	0,0788	-3,8E-06	0,92
Junho	494,209	15,552	11,598	0,0196	0,1798	-0,0012	0,0010	0,1110	0,0820	-3,7E-06	0,88
Julho	590,460	19,264	13,948	0,0252	0,2642	-0,0013	0,0012	0,1003	0,0883	-4,2E-06	0,92
Agosto	278,317	7,605	6,522	0,0555	0,1329	-0,0011	0,0017	-0,0230	0,0444	-5,8E-06	0,92
Setembro	-204,205	-5,816	-7,197	0,0713	-0,0436	-0,0011	0,0019	-0,1356	-0,0554	-6,3E-06	0,90
Outubro	386,753	14,588	7,817	0,0467	0,2890	-0,0015	0,0017	-0,0350	0,0228	-5,2E-06	0,92
Novembro	625,453	23,813	13,259	0,0294	0,3736	-0,0019	0,0015	0,0817	0,0579	-4,7E-06	0,92
Dezembro	699,967	23,256	16,951	0,0350	0,3128	-0,0015	0,0015	0,1505	0,1104	-4,4E-06	0,93
Anual	471,325	15,4768	10,9417	0,0395	0,2328	-0,0013	0,0014	0,0561	0,0661	-4,6E-06	0,93

Tabela 10 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa da temperatura mínima média mensal e anual

Mês	Coeficientes das equações de regressão linear múltipla										
	Intersec	ϕ	λ	ξ	$\phi\lambda$	$\phi\xi$	$\lambda\xi$	ϕ^2	λ^2	ξ^2	R^2
Janeiro	-302,180	-20,476	-3,435	0,034	-0,18856	0,00169	-0,00002	-0,24272	0,01055	-1,1E-06	0,85
Fevereiro	-365,187	-23,190	-4,715	0,034	-0,25246	0,00182	-0,00009	-0,23087	0,01201	-1,3E-06	0,85
Março	-361,183	-23,427	-4,477	0,028	-0,31173	0,00212	-0,00038	-0,16954	0,02659	-1,8E-06	0,86
Abril	-258,347	-19,473	-2,178	0,007	-0,32683	0,00223	-0,00090	-0,06473	0,05123	-1,8E-06	0,83
Mai	-691,170	-34,730	-12,679	0,008	-0,57454	0,00333	-0,00145	-0,12341	-0,00142	-2,3E-06	0,83
Junho	-786,347	-37,420	-15,389	0,002	-0,60627	0,00337	-0,00159	-0,15217	-0,02231	-1,8E-06	0,81
Julho	-725,328	-34,026	-14,439	-0,003	-0,53880	0,00338	-0,00171	-0,14921	-0,02836	-2,0E-06	0,81
Agosto	-783,291	-37,708	-15,171	0,007	-0,56311	0,00344	-0,00154	-0,20682	-0,02982	-2,5E-06	0,81
Setembro	-437,011	-24,477	-7,211	0,033	-0,39861	0,00265	-0,00060	-0,10579	0,01677	-3,2E-06	0,85
Outubro	-610,234	-29,988	-11,820	0,035	-0,36887	0,00233	-0,00036	-0,26272	-0,03617	-1,9E-06	0,85
Novembro	-411,316	-22,655	-7,137	0,021	-0,24131	0,00176	-0,00033	-0,24061	-0,01717	-1,1E-06	0,85
Dezembro	-368,661	-21,618	-5,727	0,032	-0,18552	0,00147	0,00005	-0,27734	-0,01348	-8,4E-07	0,85
Anual	-508,355	-27,432	-8,698	0,020	-0,37972	0,00247	-0,00074	-0,18550	-0,00263	-1,8E-06	0,86

Tabela 11 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa da insolação média diária mensal e anual

Mês	Coeficientes das equações de regressão linear múltipla										
	Intersec	ϕ	λ	ξ	$\phi\lambda$	$\phi\xi$	$\lambda\xi$	ϕ^2	λ^2	ξ^2	R^2
Janeiro	-115,457	-1,315	-4,323	-0,0004	0,04713	-0,00042	0,00020	-0,08812	-0,05261	-2,55E-07	0,74
Fevereiro	-611,709	-19,807	-16,245	0,0020	-0,11313	-0,00012	0,00011	-0,32544	-0,13877	1,93E-07	0,67
Março	-127,387	-2,263	-4,669	-0,0055	0,15840	-0,00070	0,00025	-0,23911	-0,08231	2,65E-07	0,81
Abril	-242,089	-4,251	-8,419	0,0158	0,14257	-0,00074	0,00071	-0,27216	-0,11513	-1,03E-07	0,85
Mai	-237,141	-1,630	-9,743	-0,0167	0,01703	-0,00052	-0,00010	-0,07499	-0,10444	1,11E-07	0,85
Junho	-270,663	-5,684	-9,282	-0,0109	0,02193	-0,00048	0,00000	-0,17228	-0,10079	3,75E-08	0,86
Julho	-94,422	-0,480	-4,491	-0,0254	0,12258	-0,00066	-0,00023	-0,16631	-0,07503	7,87E-08	0,86
Agosto	-229,048	-3,712	-8,598	-0,0180	0,11033	-0,00107	0,00012	-0,23182	-0,11342	-2,47E-07	0,88
Setembro	-276,908	-3,784	-10,291	0,0045	0,17619	-0,00116	0,00064	-0,30281	-0,14411	-6,55E-07	0,92
Outubro	-307,028	-8,437	-8,894	0,0082	0,23003	-0,00038	0,00037	-0,44956	-0,14010	-8,36E-08	0,90
Novembro	-402,270	-12,118	-11,064	0,0117	0,14665	-0,00030	0,00039	-0,44134	-0,14273	-2,54E-07	0,88
Dezembro	-60,214	1,084	-3,036	0,0145	0,13825	-0,00045	0,00054	-0,13484	-0,05871	-2,82E-07	0,72
Anual	-195,271	-3,845	-6,686	0,0020	0,11648	-0,00070	0,00038	-0,23059	-0,09291	-9,35E-08	0,92

Para a espacialização dos dados de temperatura média anual, empregou-se a média aritmética dos coeficientes para a temperatura máxima e a mínima do ar. Assim sendo, a Figura 7 apresenta a variabilidade espacial da temperatura média anual no Estado de São Paulo.

Figura 7 - Temperatura média do ar no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa

Ao analisar a Figura 7, percebe-se que as regiões mais ao sul do Estado, assim como as regiões de elevadas altitudes, são as que apresentam menores valores de temperatura média do ar anual. Isso evidencia o fato pelo qual não são encontradas lavouras de cana-de-açúcar de cunho industrial naquelas regiões, o que se deve às altas probabilidades de ocorrência de geada.

Da mesma forma como foi feito para a temperatura média do ar, a seguir é apresentado o mapa de temperatura média do ar do mês mais frio (Figura 8), sendo que esse correspondente ao mês de julho (Tabela 10). Esse mapa evidencia que durante o inverno, boa parte das regiões produtoras de cana-de-açúcar apresentam temperatura média abaixo da temperatura do ar de 20°C, a qual é considerada por Bacchi e Souza (1978) como a temperatura base da cultura, portanto limitando o

crescimento dos canaviais. Isso mostra a coerência de se adotar um fator de penalização por estresse térmico nessas áreas, já que a cana-de-açúcar é sensível ao frio e especialmente às geadas.

Figura 8 - Temperatura média do ar do mês mais frio do ano no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa

A seguir é apresentado o mapa de insolação média diária anual (Figura 9), sendo que essa é uma variável meteorológica que tem importante papel tanto na estimativa da evapotranspiração de referência como na estimativa das produtividades, já que representa a disponibilidade de energia radiante no ambiente.

Observa-se que os maiores valores de insolação se concentram na região centro-norte do estado, com mais de 7 h por dia. Por outro lado, na região do Vale do Ribeira, no litoral e nas áreas de maior altitude no sul do estado, a insolação não passa de 6 h. A insolação, como variável que representa a disponibilidade de radiação solar no meio, é de grande importância para a cultura da cana-de-açúcar pois maiores níveis de radiação solar implicam em maiores níveis de produtividade potencial.

Figura 9 - Insolação diária anual média no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa

Da mesma forma como foram elaborados os mapas para as temperaturas e a insolação, elaborou-se os mapas referentes às componentes do balanço hídrico climatológico normal do Estado de São Paulo. A partir do mapa de precipitação foi elaborado o mapa de déficit hídrico médio, o qual, por sua vez, foi base para a elaboração dos mapas de produtividade atingível da cana-de-açúcar, juntamente com os “layers” das coordenadas geográficas, da altitude e da produtividade potencial.

Na Tabela 12 são apresentados os coeficientes das equações de regressão linear múltiplas, correspondentes às variáveis precipitação normal anual e aquelas relacionadas ao balanço hídrico climatológico normal.

Tabela 12 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla

Componente	Coeficientes das equações de regressão linear múltipla											
	intersec	ϕ	λ	ξ	$\phi\lambda$	$\phi\xi$	$\lambda\xi$	ϕ^2	λ^2	ξ^2	P	R ²
P	20018,26	1598,570	108,583	7,238	23,463	0,124	0,088	11,539	-3,811	-9,5E-07	—	0,50
ETP	-30475,90	-821,185	-926,461	1,983	6,927	-0,030	0,057	-27,571	-10,709	-9,9E-05	—	0,99
DEF	-7030,76	374,109	-500,44	0,570	2,858	-0,061	0,0445	3,287	-5,676	6,0E-05	-0,048	0,78
EXC	21697,36	1114,070	397,618	-0,847	-4,502	-0,021	-0,005	29,640	4,899	1,0E-04	0,917	0,93

A partir dessas equações, foi possível a obtenção dos mapas de cada componente do balanço hídrico bem como da precipitação. A seguir são apresentados os mapas de cada uma dessas variáveis (Figuras 10 a 13).

Figura 10 - Precipitação anual média no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa

Com relação ao mapa de precipitação (Figura 10), percebe-se que em grande parte do Estado a precipitação média anual oscila entre 1300 e 1400 mm. As maiores precipitações são observadas no leste e nordeste do estado, onde se localizam as maiores elevações, o que evidencia a estreita relação dessa variável meteorológica com a altitude.

Por outro lado, observando-se o mapa de evapotranspiração de referência (Figura 11), percebe-se que essa variável tem estreita relação com a insolação e com a temperatura do ar. Isso pode ser percebido já que nas mesmas regiões onde ocorrem os maiores valores tanto de insolação diária como de temperatura média do ar durante o ano, ocorrem os maiores valores de evapotranspiração de referência.

Figura 11 - Evapotranspiração de referência anual média no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa

Por meio do mapa da Figura 12, referente à deficiência hídrica anual, e o da Figura 6, nota-se que as regiões onde efetivamente é cultivada a cana-de-açúcar são aquelas que apresentam déficit hídrico anual maior do que 20 mm ano^{-1} . Isso pode ser explicado pelo fato da cana-de-açúcar exigir um período seco durante o ano para favorecer o processo de maturação. Regiões sem déficit hídrico são normalmente inaptas ao cultivo dessa cultura, como é o caso do sul do Estado de São Paulo e Vale do Ribeira. Na região de Assis, tradicional região produtora de cana-de-açúcar, percebe-se que os déficits não são tão acentuados, porém, as temperaturas mais elevadas aliadas aos altos valores de insolação proporcionam condições favoráveis ao cultivo, sendo, portanto, uma região apta ao cultivo da cana-de-açúcar.

Figura 12 - Déficit hídrico normal anual no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa

Com relação ao excedente hídrico (Figura 13), percebe-se um padrão de variação espacial semelhante ao observado para as precipitações. Isso se deve ao fato de que os excedentes hídricos ocorrerem predominantemente durante a estação chuvosa, quando as chuvas superam a capacidade máxima de retenção de água dos solos, havendo assim a ocorrência de drenagem profunda. As regiões em que ocorrem maiores valores de excedente hídrico são aquelas de maior altitude, que corresponde aos locais de maiores precipitações e menores evapotranspirações.

Figura 13 - Excedente hídrico normal anual no Estado de São Paulo, com base nos modelos lineares de estimativa

4.2 Produtividade Potencial e Produtividade atingível

4.2.1 Produtividade Potencial

Da mesma maneira como foram obtidas as equações para a estimativa dos atributos do clima e do balanço hídrico, elaborou-se as equações para a espacialização das informações relativas à produtividade potencial.

Na Tabela 13 são apresentados os coeficientes das equações de regressão linear múltipla para o cálculo e mapeamento da produtividade potencial para cada época de plantio considerada para a cana planta e para os três ciclos de maturação da cana soca.

Tabela 13 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa das produtividades potenciais das canas planta (CP) e soca (CS) no Estado de São Paulo nos diferentes ciclos de cultivo

Época de cultivo	Coeficientes das equações de regressão										
	intersec	ϕ	λ	ξ	$\phi\lambda$	$\phi\xi$	$\lambda\xi$	ϕ^2	λ^2	ξ^2	R^2
CP Fev	4544,54	-80,56	-163,17	0,333	1,877	-0,011	0,012	-4,240	-2,04	-2E-05	0,97
CP Mar	-5385,99	-161,42	-155,81	0,672	0,866	0,005	0,010	-4,753	-1,73	-8E-05	0,98
CP Inv	-4489,58	-140,22	-127,03	0,540	0,718	0,004	0,008	-4,069	,42	-6E-05	0,98
CP Set	-3269,32	-63,70	-112,33	0,283	1,103	-0,006	0,009	-2,847	-1,35	-2E-05	0,98
CP Out	-2881,62	-51,66	-103,21	0,216	1,258	-0,007	0,008	-2,766	-1,30	-1E-05	0,97
CS Prec	-3035,07	-64,34	-103,08	0,217	1,227	-0,006	0,007	-2,992	-1,30	-1E-05	0,98
CS Med	-3071	-66,25	-103,50	0,228	1,155	-0,005	0,007	-2,948	-1,28	-1E-05	0,98
CS Tardia	-2811,81	-55,35	-98,30	0,200	1,181	-0,007	0,007	-2,753	-1,24	-1E-05	0,98

A partir das equações de regressão apresentadas na Tabela 13 foram confeccionados os mapas de produtividade potencial da cana-de-açúcar para cada época de cultivo e ciclo de maturação (cana planta e cana soca) no Estado de São Paulo. Nas Figuras 14 a 19 são apresentadas as produtividades potenciais da cana planta. Observa-se que há variação da PP com a mudança da época de plantio. As maiores PP são observadas nos plantios de fevereiro, março (Figura 14 e 15) e outubro (Figura 18), enquanto que as menores produtividades ocorrem durante os plantios de setembro (Figura 17). Ao se ponderar a PP pela porcentagem da área que cada época de plantio ocupa na propriedade, obteve-se a PP ponderada (Figura 19). Observa-se nesse mapa que as maiores produtividades potenciais ocorrem na região centro-norte do estado. Darli et al. (2008) obtiveram em um cultivo irrigado e adubado, ou seja, sob condições favoráveis à expressão do potencial genético da cultura, iniciado em março na região de Botucatu, SP, uma produtividade média de 300 t ha⁻¹. Mesmo essa produtividade sendo cerca de 20 t ha⁻¹ superior à estimada neste trabalho (Figura 15), os resultados são bastante semelhantes, já que esses autores realizaram operações de manejo da cultura, que não são considerados no modelo agrometeorológico empregado.

Figura 14 - Produtividade potencial da cana planta de 18 meses, plantada no mês de fevereiro no Estado de São Paulo

Figura 15 - Produtividade potencial da cana planta de 18 meses, plantada no mês de março no Estado de São Paulo

Figura 16 - Produtividade potencial da cana planta de 15 meses, plantada no mês de julho no Estado de São Paulo

Figura 17 - Produtividade potencial da cana planta de 12 meses, plantada no mês de setembro no Estado de São Paulo

Figura 18 - Produtividade potencial da cana planta de 12 meses, plantada no mês de outubro no Estado de São Paulo

Figura 19 - Produtividade potencial ponderada da cana planta considerando-se diferentes épocas de plantio e ciclos, no Estado de São Paulo

Uma análise mais detalhada dos mapas referentes ao cultivo de cana planta mostra que a produtividade potencial, no caso da cana planta de 18 meses, variou de valores menores que 220 t ha⁻¹ a valores maiores que 280 t ha⁻¹, sendo que na região canavieira do Estado, foram estimadas produtividades maiores do que 260 t ha⁻¹. No caso de cultivos iniciados no período de inverno, a produtividade potencial nas regiões tradicionais de cultivo da cana-de-açúcar apresentou queda brusca para 215 t ha⁻¹, atingindo valores um pouco maiores do que 230 t ha⁻¹ no centro do Estado. Finalmente, quando se observa os mapas referentes à cana planta de setembro e outubro, observa-se que a produtividade potencial atinge, em ambos os casos, o valor mínimo de 170 t ha⁻¹ na região canavieira. Isso ocorre devido ao encurtamento do ciclo (12 meses), gerando um menor acúmulo de biomassa e, conseqüentemente, uma menor produtividade potencial da cultura.

Nas Figuras 20 a 23 são apresentados os mapas referentes às produtividades potenciais da cana soca, considerando-se os três ciclos de maturação (precoce, média e tardia), sendo esses valores representativo da média de cinco cortes.

Figura 20 - Produtividade potencial da cana soca precoce no Estado de São Paulo

Figura 21 - Produtividade potencial da cana soca média no Estado de São Paulo

Figura 22 - Produtividade potencial da cana soca tardia no Estado de São Paulo

Figura 23 - Produtividade potencial ponderada para a cana soca no Estado de São Paulo, considerando-se os diferentes ciclos de maturação (precoce, média e tardia)

Da mesma maneira com que foram analisados os mapas referentes à cana planta e aos ciclos de cultivo, observa-se que no caso dos cultivos referentes à cana soca ocorreu uma diminuição da área de maior produtividade potencial, como pode ser observado pela diminuição da área com potencial produtivo acima de 180 t ha^{-1} , principalmente na região logo acima do município de Piracicaba nos casos dos ciclos precoce e médio (Figuras 20 e 21). Com relação ao ciclo tardio, como a cultura já está exposta a condições meteorológicas principalmente de temperatura e fotoperíodo mais apropriadas para o crescimento e desenvolvimento, nota-se que a área coberta com maiores níveis de produtividade é bem maior do que as outras épocas (Figura 22). Além disso, nota-se também que os níveis de produtividade nas regiões de Avaré e Botucatu aumentaram de cerca de 10 t ha^{-1} , apenas considerando-se a variação da época de cultivo. Sendo assim, o mapa relativo à produtividade potencial ponderada da cana soca (Figura 23) se assemelha mais aos mapas das canas soca de ciclo precoce e médio, uma vez que essas duas somadas têm uma contribuição mais significativa do que produtividade da cana soca de ciclo tardio.

Com o objetivo de integrar todos os ciclos considerados neste trabalho, fez-se o mapa de produtividade potencial da cana-de-açúcar ponderado pelas épocas de cultivo admitidas, ou seja, considerando-se as canas planta e as socas, na diferentes épocas de cultivo (Figura 24).

Figura 24 - Produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, considerando-se as canas planta e soca, nas diferentes épocas de plantio e ciclos de maturação

A partir do mapa geral da PP é possível inferir que as áreas produtoras de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo com a finalidade de fornecimento de matéria prima para usinas produtoras de etanol e açúcar, apresentam um potencial produtivo acima de 180 t ha^{-1} . Esse valor serve como um referencial apenas, já que a grande maioria dos cultivos no estado é sob condições de sequeiro. No entanto, esse dados de PP, quer seja da cana planta como da soca, ou ainda da ponderada, serve como um indicativo dos níveis de produtividade que poderiam ser alcançados caso o déficit hídrico fosse eliminado com o emprego da irrigação.

Os resultados obtidos no presente estudo se assemelham aos valores de cana irrigada obtidos por Delgado Rojas e Barbieri (1999), que encontraram produtividades da ordem de 180 t ha^{-1} .

4.2.2 Produtividade Atingível

Para a estimativa da produtividade da cultura nos diferentes ciclos em que foram realizadas as simulações tanto para cana planta como para cana soca, foi realizada a penalização da produtividade potencial por meio do efeito do déficit hídrico. Assim sendo, na Tabela 14 estão apresentadas os coeficientes das equações de regressão linear múltipla utilizadas para a caracterização e espacialização da produtividade atingível da cultura nas diferentes épocas de cultivo.

Tabela 14 - Coeficientes dos modelos de regressão linear múltipla para a estimativa das produtividades atingíveis das canas planta e soca no Estado de São Paulo

Época de cultivo	Coeficientes das equações de regressão											Da	PP	R ²
Intersec	ϕ	λ	ξ	$\phi\lambda$	$\phi\xi$	$\lambda\xi$	ϕ^2	λ^2	ξ^2					
CP Fev	1326,84	75,240	23,207	-0,402	-0,199	0,003	-0,009	2,155	0,222	2E-05	-0,263	1,025	0,68	
CP Mar	-648,52	27,318	-46,622	-0,538	1,127	-0,006	-0,007	-0,559	-0,780	2E-05	-0,300	0,306	0,85	
CP Inv	-4281,52	-174,011	-122,096	-0,512	1,243	-0,003	-0,007	-5,513	-1,579	5E-05	-0,250	-1,144	0,70	
CP Set	-2044,62	47,805	-111,789	0,427	0,741	0,001	0,009	0,164	-1,284	5E-06	-0,148	-0,259	0,56	
CP Out	-1563,09	64,486	-98,314	0,401	0,689	0,000	0,009	0,596	-1,142	3E-06	-0,110	0,083	0,40	
CS Prec	-4743,75	-42,471	-182,305	0,441	0,908	-0,002	0,010	-2,007	-2,015	-6E-06	-0,174	-1,008	0,70	
CS Med	-2615,06	-19,077	-110,789	0,072	0,734	-0,001	0,003	-1,324	-1,295	1E-05	-0,175	-0,879	0,70	
CS Tardia	-1244,26	64,501	-85,223	0,334	0,685	0,000	0,008	0,604	-1,013	5E-06	-0,103	0,113	0,41	

De posse das equações de regressão linear múltiplas, juntamente com os “layers” de produtividade potencial e de déficit hídrico anual, foi possível estimar as produtividades atingíveis. A partir dessas equações foram gerados os mapas correspondentes para cada ciclo de simulação da cultura, conforme apresentado nas Figuras a seguir.

A partir dos mapas de produtividade atingível percebe-se claramente o efeito do déficit hídrico cada vez mais pronunciado no que diz respeito às produtividades no Estado. No caso da cana planta de 18 meses (Figuras 25 e 26), os níveis de produtividade variaram de 100 a 180 t ha⁻¹, sendo que quando se considerou o ciclo de inverno, ou seja, 15 meses (Figura 27), as produtividades já tiveram uma redução para 80 até 130 t ha⁻¹, evidenciando o forte efeito do déficit hídrico com o avanço na época de plantio para o período seco do ano. No caso das canas planta de 12 meses (Figuras 28 e 29), já ocorre um efeito menos pronunciado do efeito do déficit hídrico, já que há uma tendência de aumento dos níveis pluviométricos nos meses de setembro e outubro. Devido a isso, conforme apresentado nos mapas relativos aos meses de plantio, percebe-se que os níveis de produtividade atingível tornam a

aumentar para o ciclo da cultura simulado em outubro, quando as produtividades ficam acima de 105 t ha^{-1} em todo o Estado.

Figura 25 - Produtividade atingível da cana planta de 18 meses, plantada no mês de fevereiro, no Estado de São Paulo

Darli et al. (2002) obtiveram dados reais médios de produtividade de cana planta, em Botucatu, SP, um pouco abaixo dos obtidos neste trabalho (120 a 130 t ha^{-1}), sob condições de sequeiro em torno de 98 t ha^{-1} . A média de produtividade obtida pelos autores deveria ser mais elevada porque houve problemas com o desenvolvimento radicular e lixiviação de nutrientes no solo.

No caso dos ciclos simulados para a produtividade atingível da cana soca durante as três épocas de cultivo consideradas (precoce, média e tardia) percebe-se claramente o efeito do déficit hídrico na produtividade, da mesma forma como foi observado para a cana planta. A seguir são apresentados os mapas referentes à produtividade atingível da cana soca nos seus respectivos ciclos de cultivo (Figuras 31 a 34).

Figura 26 - Produtividade atingível da cana planta de 18 meses, plantada no mês de março, no Estado de São Paulo

Figura 27 - Produtividade atingível da cana planta de 15 meses, plantada no mês de julho, no Estado de São Paulo

Figura 28 - Produtividade atingível da cana planta de 12 meses, plantada no mês de setembro, no Estado de São Paulo

Figura 29 - Produtividade atingível da cana planta de 12 meses, plantada no mês de outubro, no Estado de São Paulo

Figura 30 - Produtividade atingível ponderada para a cana planta no Estado de São Paulo, considerando-se as diferentes épocas de plantio

Darli et al. (2002) obtiveram dados reais médios de produtividade de cana planta em Botucatu, SP, um pouco abaixo dos obtidos neste trabalho (120 a 130 t ha⁻¹), sob condições de sequeiro em torno de 98 t ha⁻¹. A média de produtividade obtida pelos autores deveria ser mais elevada porque houve problemas com o desenvolvimento radicular e lixiviação de nutrientes no solo.

No caso dos ciclos simulados para a produtividade atingível da cana soca durante as três épocas de cultivo consideradas (precoce, média e tardia) percebe-se claramente o efeito do déficit hídrico na produtividade, da mesma forma como foi observado para a cana planta. A seguir são apresentados os mapas referentes à produtividade atingível da cana soca nos seus respectivos ciclos de cultivo (Figuras 31 a 34).

Scarpari (2007), aplicando o modelo “PREDPOL” para a região de Piracicaba, SP, obteve valores de produtividade da cana-de-açúcar, cujo início do ciclo ocorreu nos meses de maio, agosto e outubro, da ordem de 75, 85 e 115 t ha⁻¹, respectivamente, resultados que são compatíveis com os obtidos nas Figuras 31, 32 e 33.

Figura 31 - Produtividade atingível da cana soca precoce no Estado de São Paulo

Figura 32 - Produtividade atingível da cana soca média no Estado de São Paulo

Figura 33 - Produtividade atingível da cana soca tardia no Estado de São Paulo

Figura 34 - Produtividade atingível ponderada para a cana soca no Estado de São Paulo, considerando-se os diferentes ciclos de maturação (precoce, médio e tardio)

De acordo com os mapas apresentados percebe-se o efeito do déficit hídrico sobre a produtividade atingível também da cana soca. Percebe-se ao se comparar o mapa relativo à cana soca de ciclo precoce (Figura 31) com o mapa de cana soca de ciclo médio (Figura 32), que ocorre uma maior área composta por produtividades menores a 60 t ha^{-1} no primeiro na porção norte do Estado, fato que ocorre devido ao maior período de déficit hídrico que os canaviais precoces enfrentam ao longo de seus ciclos. Por outro lado, nos ciclos de cultivo da cana soca média e tardia (Figuras 32 e 33), esse período de estresse hídrico no estabelecimento do canavial é menor, o que resulta em produtividades maiores, especialmente no caso da cana soca de ciclo tardio, na qual as produtividades não apresentam valores menores do que 105 t ha^{-1} , já que desde o estabelecimento do canavial a ocorrência de deficiências hídricas é menor.

Estudos realizados com modelagem para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, ciclo de “cana soca”, na região centro norte do Estado de São Paulo utilizando o índice de vegetação gerado pelo sensor MODIS (PÍCOLI et al., 2009) concordaram com os resultados obtidos na mesma região apresentados na Figura 34, ou seja, produtividades da ordem de 80 t ha^{-1} . Pela análise das Figuras 30, 34 e 35, percebe-se que os valores de produtividade atingível acompanham fielmente a distribuição espacial do déficit hídrico no Estado de São Paulo. Dessa maneira, observa-se que nas principais regiões canavieiras do Estado de São Paulo a produtividade atingível alcança valores, em grande parte do Estado, no máximo de 110 t ha^{-1} , exceto na região de Assis, onde há ocorrência de solos com maior capacidade de armazenamento de água (Nitossolos) e dessa maneira produtividades mais elevadas. Por outro lado, as regiões do Estado onde aparecem as maiores faixas de produtividade não são apropriadas para o cultivo da cana-de-açúcar. Assim sendo, essas regiões não possuem condições meteorológicas apropriadas, principalmente com relação aos baixos valores de radiação solar (alta nebulosidade pela proximidade do oceano) e ausência de um período do ano seco, devido aos baixos valores de déficit hídrico anual médio, ou então condições topográficas inapropriadas para o manejo e tratos culturais por apresentarem terrenos bastante acidentados.

Figura 35 - Produtividade atingível da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, considerando-se as canas planta e soca, nas diferentes épocas de plantio e ciclos de maturação

4.3 Mapeamento da eficiência climática (η) e desempenho do modelo agrometeorológico para a estimativa de produtividade da cana-de-açúcar

4.3.1 Mapeamento da eficiência climática (η)

Para o mapeamento da eficiência climática de cada ciclo de cultivo, tanto da cana planta como da cana soca, empregou-se a técnica de sobreposição dos mapas de produtividade atingível e potencial para a obtenção da razão entre essas duas variáveis, obtendo-se desse modo a eficiência climática, que são apresentadas nos mapas a seguir (Figuras 36 a 46). A seguir estão apresentados os mapas correspondentes a cada época de cultivo.

Figura 36 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em fevereiro

Figura 37 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em março

Figura 38 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em julho (inverno)

Figura 39 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em setembro

Figura 40 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – início do ciclo simulado em outubro

Figura 41 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana planta Ponderada

A partir dos mapas de eficiência climática relativos à cana planta de 18 e 15 meses, percebe-se que há uma grande abrangência dos municípios principalmente a norte do Estado quanto à diminuição da eficiência climática ao passo que se avança a época de plantio da cultura. Diferentemente do que ocorre quando se considera as épocas de cana planta de 12 meses, ou seja, no plantio simulado em setembro, a eficiência climática é menor à eficiência climática do plantio simulado em outubro, já que nessa época ocorre a elevação dos níveis pluviométricos no Estado de São Paulo, refletindo em maior eficiência climática da cultura.

Em geral, pela análise do mapa de eficiência climática da cana planta, os valores oscilam entre 0,45 e 0,55 nas principais regiões canavieiras do Estado. Entretanto, esses níveis de eficiência atingem valores até 0,65 em regiões favoráveis em termos edáficos, como ocorre em Assis, ou por outro lado, em regiões com elevados índices de pluviosidade e elevados valores de altitude como ocorre no oeste e Sul do Estado, porém não são apropriados ao cultivo da cana-de-açúcar. A seguir estão apresentados os mapas relativos à eficiência climática da cana soca no Estado de São Paulo.

Figura 42 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana soca de ciclo precoce

Figura 43 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana soca de ciclo médio

Figura 44 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana soca de ciclo tardio

Figura 45 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo – Cana soca Ponderada

A partir dos mapas de eficiência climática pode-se observar, da mesma maneira com que ocorreu nos mapas de produtividade atingível, uma diminuição da área representativa aos menores valores de eficiência climática com o avanço da época de cultivo, ou seja, de cana soca de ciclo precoce para cana soca de ciclo médio e, mais pronunciadamente, de cana soca de ciclo tardio. Analisando essa última, percebe-se que apenas na região central e na região noroeste do Estado de São Paulo ocorrem valores de eficiência climática abaixo de 0,55. A partir disso, conclui-se que a época mais apropriada ao cultivo de cana soca seria a partir de outubro.

Abaixo está apresentado o mapa de eficiência climática relativo a ponderação de todas as épocas de cultivo da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Sendo assim, os valores das classes de eficiência climática foram utilizados com a finalidade de criar classes climáticas de ambientes de produção, assim como com os dados de produtividade atingível, com as quais será refinada a classificação atual desses ambientes, já que é apenas baseada em dados de produtividade e características químicas do solo, como fertilidade.

Figura 46 - Variabilidade espacial da eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar no Estado considerando a ponderação de todas as épocas de cultivo simuladas (planta e soca)

Analisando-se o mapa acima, percebe-se que em direção ao sul do Estado, o valor de eficiência climática aumenta. Isso se justifica porque a produtividade potencial nessas áreas é baixa em relação à região tradicionalmente canavieira do Estado e por isso, numa relação com a produtividade atingível, ocorrem elevados valores de eficiência climática ao sul do Estado.

4.3.2 Desempenho do modelo agrometeorológico de produtividade da cana-de-açúcar

Ao se confrontar os mapas de produtividade atingível obtidos pela modelagem agrometeorológica com informações provenientes do campo, percebeu-se uma superestimativa dos valores dessa componente principalmente em locais onde as temperaturas eram mais baixas. Portanto, optou-se pela inserção de um fator relativo de penalização da produtividade por ocorrência de temperaturas do ar menores que 2°C no abrigo meteorológico, caracterizando, dessa maneira, a ocorrência de geadas.

Assim sendo, houve uma penalização da produtividade potencial da cultura, já que essa é calculada em função da interação do genótipo com as condições climáticas vigentes durante o ciclo. A partir disso, gerou-se um mapa de probabilidade de ocorrência de temperatura mínima absoluta do ar (Figura 47), caracterizando o efeito de estresse pelo frio, assim como um mapa do fator de penalização correspondente a cada probabilidade de ocorrência dessas temperaturas (Figura 48).

Figura 47 - Probabilidade de ocorrência de temperatura mínima absoluta no abrigo meteorológico menor do que 2 °C

Figura 48 - Fator de penalização da produtividade pelo estresse por frio

De acordo com a Figura 47, percebe-se que nos locais com elevadas altitudes, há uma maior probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas abaixo de 2 °C. Para esses casos nota-se, ao avaliar a Figura 48, que nesses locais o fator de penalização tanto das produtividades potencial como da atingível é mais severo, havendo casos em que tal fator atinge cerca de 0,2, o que representa 80% de quebra da produtividade por ocorrência de baixas temperaturas.

As Figuras 49 e 50 apresentam, respectivamente, os mapas de produtividade potencial e atingível, após a penalização pelo fator de estresse térmico.

Figura 49 - Produtividade potencial ponderada da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, considerando o efeito de penalização pelo estresse térmico

Figura 50 - Produtividade atingível ponderada da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, considerando o efeito de penalização pelo estresse térmico

Analisando-se os mapas apresentados nas Figuras 49 e 50 percebe-se que o efeito da penalização pela ocorrência de baixas temperaturas do ar, tanto no caso da produtividade potencial como da atingível proporcionou a obtenção de valores mais próximos da realidade, conforme aqueles reportados por Prado (2011). A queda de temperatura afeta a capacidade da planta em expressar o potencial genético, acarretando em diminuição da produtividade. Para avaliar a real contribuição do fator de penalização pelo estresse térmico, compararam-se os dados de produtividade atingível, sem e com o fator de penalização por baixas temperaturas, com os dados de produtividade real, obtidos junto ao banco de dados do IBGE. Observa-se na Figura 51 (a e b) que houve uma importante contribuição do fator de penalização pelo estresse térmico (frio) para um melhor ajuste dos dados calculados pelo modelo agrometeorológico aos dados de produtividade real observados.

Figura 51 - Relação entre a produtividade real, proveniente do banco de dados do IBGE, e a produtividade atingível, estimada pelo modelo agrometeorológico, sem (a) e com (b) a penalização pelo fator de estresse térmico

A partir da Figura 51 e da Tabela 15, nota-se que houve uma melhoria expressiva do desempenho do modelo quando incorporado o fator de penalização por frio, havendo alterações em todos os índices estatísticos analisados.

Tabela 15 - Coeficientes estatísticos de precisão (R^2), acurácia (d), desempenho (C) e erro médio (RMSE, $t\ ha^{-1}$) como indicadores do desempenho do modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar, sem e com o fator de penalização por baixas temperaturas

Produtividade Atingível	Índices Estatísticos			
	R^2	d	C	RMSE
Calculada	0,47	0,78	0,54	5,60
Calculada com efeito geada	0,58	0,83	0,63	5,00

As informações contidas na Figura 51 também foram analisadas por meio da relação entre a quebra de produtividade e o déficit hídrico acumulado no ciclo, nas diferentes regiões canavieiras. Essa relação é apresentada na Figura 52.

Figura 52 - Relação entre a quebra de produtividade e o déficit hídrico anual das regiões canavieiras do Estado de São Paulo

De acordo com a Figura 52, percebe-se que há uma quebra de $11,2\ t\ ha^{-1}$ para cada $100\ mm$ de déficit hídrico. Esse resultado corrobora com aqueles obtidos por Holden (1998) e Tilley e Chapman (1999), que observaram que a produtividade pode ser reduzida de 10 a $15\ t\ ha^{-1}$ para cada $100\ mm$ de déficit hídrico. Por outro lado, PRADO (2008) observou que essa relação, para condições operacionais, é da ordem de $7\ t\ ha^{-1}$ para cada $100\ mm$ de deficiência hídrica. Essas diferenças entre os valores de quebra de produtividade em função da deficiência hídrica basicamente

ocorrem devido a aspectos como manejo da cultura, textura e estrutura do solo, variedade e adubação.

Embora o valor do coeficiente de determinação (R^2) não tenha sido próximo da unidade, por meio do resultado do “teste t” de Student a 1%, verificou-se que há uma correlação (r) significativa entre os dados de produtividade atingível em relação aos dados de déficit hídrico anual ($r = -0,69$).

4.4 Distribuições de freqüência da produtividade atingível das principais regiões canavieiras do Estado de São Paulo

Nessa etapa buscou-se identificar quais os valores mais prováveis de produtividade atingível de alguns municípios tradicionais sucroalcooleiros. Sendo assim, realizaram-se as distribuições de freqüência para tal identificação, já que os mapas de produtividade atingível foram confeccionados com valores provenientes da média dos 30 anos em que foram realizadas as simulações.

Assim sendo, a seguir são apresentadas as distribuições de freqüência dos municípios: Assis, Araçatuba, Guaíra, Itapeva, Piracicaba e Ribeirão Preto (Tabela 16). Ainda, nos casos em que não se obteve um coeficiente de Smirnov-Kolmogorov (valor D) menor que 5%, ainda considerou-se a distribuição dos dados como sendo normal, já que a distribuição dos dados apresentadas no gráfico QQ-plot mostraram-se bastante próximas a linha de distribuição normal de probabilidades.

Tabela 16 - Produtividade atingível provável para diferentes regiões produtoras de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

Município	Probabilidade									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	99%
Assis	85,0	92,5	97,8	102,4	106,7	111,0	115,5	120,9	128,3	146,0
Araçatuba	51,1	57,6	62,4	66,4	70,2	73,9	78,0	82,7	89,3	104,8
Guaíra	48,3	54,1	58,2	61,8	65,2	68,5	72,1	76,2	82,0	95,8
Piracicaba	61,5	68,3	73,1	77,3	81,2	85,1	89,3	94,2	101,0	117,1
Ribeirão Preto	66,1	74,6	80,7	86,0	90,9	95,8	101,0	107,1	115,7	135,9
São José do Rio Preto	53,2	60,0	64,9	69,0	72,9	76,8	81,0	85,8	92,6	108,6

A Tabela 16 apresenta os valores de probabilidade de ocorrência de produtividades atingíveis abaixo de certos limiares. Por exemplo, para o município de Ribeirão Preto, a cada 10 anos em pelo menos 5 ocorrem produtividades menores ou iguais a 90,9 t ha⁻¹. Além disso, pode-se observar que a cada 10 anos ocorrem 7 anos em que a produtividade atingível é igual ou inferiores a 101,0 t ha⁻¹.

A seguir são apresentados os gráficos de distribuição de frequência relativa e acumulada para os principais municípios canavieiros do Estado de São Paulo (Figuras 53 a 61).

Figura 53 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Assis, SP

Figura 54 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Araçatuba, SP

Figura 55 - Distribuição dos resíduos da produtividade atingível em torno da distribuição teórica normal de probabilidades, em Araçatuba, SP

Figura 56 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Guairá, SP

Figura 57 - Distribuição dos resíduos da produtividade atingível em torno da distribuição teórica normal de probabilidades, em Guaira, SP

Figura 58 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Piracicaba, SP

Figura 59 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de Ribeirão Preto, SP

Figura 60 - Distribuição dos resíduos da produtividade atingível em torno da distribuição teórica normal de probabilidades, em Ribeirão Preto, SP

Figura 61 - Distribuição de frequência relativa (a) e acumulada (b) da produtividade atingível da cana-de-açúcar no município de São José do Rio Preto, SP

De posse desses gráficos, percebe-se que foi necessário obter o gráfico “QQ-Plot” para os municípios que apresentaram um valor KS (Kolmogorov-Smirnov) maior que 5%. Mesmo assim, todos os municípios considerados apresentaram um valor de KS < 10% mostrando, portanto, um grau de confiabilidade bastante elevado, já que as distribuições de probabilidade foram compostas por poucos dados. Da mesma maneira, admitiu-se que os dados de produtividade atingível apresentaram distribuição normal já que estavam bastante próximos à curva correspondente à distribuição normal teórica de probabilidades apresentada por aquele gráfico.

4.5 Classificação dos ambientes de produção sob dois enfoques climáticos: produtividade atingível (PA) e eficiência climática (η)

Atualmente, a classificação dos ambientes de produção é feita apenas se baseando em dados de produtividade real da cultura e sob aspectos edáficos. Sendo assim, elencou-se, de acordo com o mapa de produtividade atingível e eficiência climática, “classes” de ambientes de produção sob o ponto de vista climático. Na Figura 62a, essa classificação foi realizada utilizando-se o mapa de produtividade atingível ponderada (Figura 50), ou seja, considerando além do efeito

da água, o efeito das variáveis meteorológicas condicionantes da produtividade como a temperatura do ar, radiação solar e fotoperíodo.

Na Figura 62b é apresentada a classificação dos ambientes de acordo com a eficiência climática, a qual considera apenas o efeito do déficit hídrico sob a produtividade atingível da cultura.

Em ambos os casos, as classes foram divididas em sete, com intervalos de 10 t ha⁻¹ para a produtividade atingível e de 0,05 para a eficiência climática.

Ambientes Climáticos Produtividade Atingível		Ambientes Climáticos Eficiência Climática	
Ambiente	(t ha ⁻¹)	Ambiente	Eficiência Climática
P1	101 - 110	EC1	0,61 - 0,65
P2	91 - 100	EC2	0,56 - 0,60
P3	81 - 90	EC3	0,51 - 0,55
P4	71 - 80	EC4	0,46 - 0,50
P5	61 - 70	EC5	0,41 - 0,45
P6	51 - 60	EC6	0,35 - 0,40
P7	< 50	EC7	< 0,35

(a)

(b)

Figura 62 - Classificação dos ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar (a) sob o ponto de vista climático de produtividade atingível e (b) sob o ponto de vista climático da eficiência climática

4.6 Estudos de casos

Para a realização de alguns estudos de caso utilizando as classificações propostas acima, foram utilizados alguns municípios com características climáticas diferentes, o que obviamente resulta em diferentes ambientes sob o enfoque climático de “eficiência climática” e de “produtividade atingível”.

Assim sendo, por exemplo, se tivermos um solo classificado como Latossolo Vermelho acriférrico no município de Guaíra (ARATANI et al., 2009) e o mesmo solo no município de São Carlos (TREMOCOLDI, 2003), esses ambientes sob a classificação proposta por Prado (2011) se enquadram como sendo pertencentes a um mesmo ambiente de produção “E1”, ou seja, apresentam um solo cuja expectativa de produtividade é em torno de 70 t ha⁻¹.

Entretanto, de acordo com a proposta de reclassificação desses ambientes em termos de “eficiência climática” e “produtividade”, esses municípios apresentam diferentes condições de produção (Figura 63).

Figura 63 - Representação espacial do estudo de caso para alguns municípios de São Paulo considerando o enfoque da classificação dos ambientes de produção pela produtividade atingível (a) e eficiência climática (b).

Sendo assim, o município de Guaíra, que se encontra em um ambiente de produção do tipo “P5-EC7”, apresenta-se climaticamente mais restritivo à obtenção de elevadas produtividades do que o município de São Carlos, que apresenta ambiente de produção do tipo “P2-EC4”.

É importante salientar que nas classificações com enfoque climático, quanto maior o número da classificação, mais crítico é o ambiente.

Outro enfoque que se pode empregar à presente proposta de classificação dos ambientes de produção sob o enfoque climático, seria para a avaliação dos efeitos compensatórios entre as condições edáficas e climáticas. Sendo assim, um ambiente deficiente em termos de solo poderia ter uma condição climática que favorecesse a obtenção de altas produtividades, e dessa maneira compensaria tal deficiência.

Por outro lado, solos encontrados em uma região climaticamente restrita, como a região de Guaíra, e classificados como Nitossolo Vermelho (FILIZOLA et al., 2003) seriam enquadrados em um ambiente de produção sob ponto de vista edáfico “A1”, com expectativa de produtividade de pelo menos 100 t ha^{-1} , não correspondendo à média de produtividade observada naquela região. Ainda nesse contexto, se considerarmos um Latossolo Vermelho ácrico na região de Ribeirão Preto (ALLEONI; CAMARGO, 1995), cujas condições climáticas são mais favoráveis à obtenção de elevadas produtividades (ambiente P3-EC5), há grande possibilidade de a produtividade média ser maior do que aquela obtida em um Nitossolo Vermelho na região de Guaíra.

Obviamente, isso ocorre devido às condições climáticas as quais o sistema solo-planta está submetido, ou seja, no município de Ribeirão Preto as condições climáticas ao cultivo da cana-de-açúcar são mais favoráveis. Por esse motivo, mesmo em um solo com características mais restritivas à produção é possível atingir bons níveis de produtividade devido à maior eficiência climática e produtividade atingível, como pode ser observado na Figura 63.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram se concluir que:

- a) Mesmo com um banco de dados meteorológicos restrito, foi possível caracterizar os atributos do clima e do balanço hídrico para o estado de São Paulo;
- b) O modelo agrometeorológico empregado apresentou desempenho satisfatório já que considerou nas suas simulações, além do efeito da deficiência hídrica, a penalização por ocorrência de baixas temperaturas para o cálculo da produtividade atingível;
- c) A utilização de técnicas de modelagem agrometeorológica e de espacialização de dados possibilitaram a distinção e obtenção das classes climáticas como base para propor uma nova classificação dos ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar, no estado de São Paulo;
- d) A utilização de um sistema de informações geográficas foi fundamental para proporcionar a obtenção das classes de ambientes climáticos sob os dois aspectos considerados, mostrando-se como uma ferramenta muito útil para a simulação da variabilidade espaço-temporal das variáveis climáticas e das produtividades e eficiência climática da cultura da cana-de-açúcar;
- e) Os critérios propostos para a classificação dos ambientes de produção para cana-de-açúcar sob o enfoque climático, possibilitaram a obtenção de informações mais detalhadas, permitindo se ter uma melhor caracterização dos fatores limitantes à produção dessa cultura nas diferentes regiões do estado de São Paulo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 14 abr. 2010.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Óxidos de ferro e de alumínio e a mineralogia da fração argila desferrificada de latossolos ácricos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n. 5, p.416-421, 1995.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; GONÇALVES, J. L. M.; SENTELHAS, P. C. Modeling mean air temperature for Brazil using linear models with integrated variables. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, 2011. In press.

ANDRIOLI, K. G.; SENTELHAS, P. C. Brazilian maize genotypes to water déficit estimated through a simple crop yield model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 7, p. 653-660, July, 2009.

ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um latossolo vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.33, p.677-687, 2009.

ARGENTON, P. E. **Influência das variáveis edafoclimáticas e de manejo 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.

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; EVANGELISTA, S. R.; PILAU, F. P.; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J. Sistema de previsão de safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 615-625, maio 2007.

ASSIS, F. N. **Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuvas e de dias secos em Piracicaba - SP e Pelotas - RS**. 1991. 134 p. Tese (Doutorado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

ASTOLPHO, F.; CAMARGO, M. B. P.; PEDRO JUNIOR, M. J.; PALLONE FILHO, W. J.; BARDIN, L. Regionalização de riscos de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais para o Estado de São Paulo com base em modelos probabilísticos e digitais de elevação. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 1, p. 139-148, 2005.

BACCHI, O. O. S.; SOUZA, J. A. G. C. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR

CANE TECHNOLOGISTS, 1., 1978, London. **Anais...** London: ISSCT, 1978. v. 2, p. 1733-1741.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*):** um modelo matemático fisiológico de estimativa. 1993. 143 p. Tese (Doutorado em Agrometeorologia) – 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, Coordenadoria Regional Sul, 1977. 22 p.

CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. **Produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: ESALQ, 1993. 78 p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes modelos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 2, p. 279-292, 1986.

CAMARGO, M. B. P.; ORTOLANI, A. A.; PEDRO JUNIOR, M. J. Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade para o cultivar de laranja Valência. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 171-178, 1999.

CAMPBELL, R. B.; CHANG, J. H.; COX, D. C. Evapotranspiration of sugar-cane in Hawaii as measured by in-field lysimeters in relation to climate. **International Society of Sugar Technology**, Hawaii, v. 9, p. 637-649, 1960.

CARRETERO, M. V. **Utilização do tanque de evaporação classe “A” para controle da irrigação por gotejamento em soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*).** 1982. 86 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

CARVALHO, G. L. **Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006.** 2009. 120 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CASAGRANDE, A. A. Crescimento da cana-de-açúcar. **STAB, Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 14, n. 5, p. 7-8, 1996.

CERRI, D. G. P. **Agricultura de precisão em cana-de-açúcar:** instrumentação de uma colhedora, mapeamento da produtividade e de atributos do solo. 2005. 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola: Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

CHANG, J. Microclimate of sugar-cane. **Hawaiian Planters' Record**, Honolulu, v. 3, p. 195-225, 1961.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar**. Brasília, 2010. 12 p.

COOPERSUCAR. Disponível em:<http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/cana_acucar.asp> Acessado em: 21 jul. 2010.

CORREA, S. T. R. **Adaptação do modelo LINTUL (Light Interception and Utilization) para estimação da produtividade da produtividade potencial da cultura da soja**. 2008. 107 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

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

DA SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F.; VENDITE, L. L. Modelos de transferência de metal pesado em cana-de-açúcar adubada com composto de lixo urbano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.119-128, 2007.

DARLI, A. B.; CRUZ, R. L. Efeito da frequência da irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). **Irriga**, Botucatu, v.7 , n.1, p. 29-34, 2002.

DARLI, A. B.; CRUZ, R. L.; GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.1, p.1-11, 2008.

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

DELGADO-ROJAS, J. S.; BARBIERI, V. Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 67-73, 1999.

DIAS, F. L. F. **Relação entre a produtividade, clima, solos e variedades de cana-de-açúcar, na Região Noroeste do Estado de São Paulo**. 1997. 64 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

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

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 179 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

_____. **Efeitos da água no rendimento das culturas.** Roma: FAO, 1994. 212 p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements.** Rome: FAO, 1975. 179 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

EMBRAPA/CNPq. Agência de informação da Embrapa – cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, 2007. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_33_711200516717.html>. Acesso em: 15 set. 2011

FAO. **Crop evapotranspiration.** Rome, 1998. 236 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. **La canne à sucre.** Paris: Ed. Maisonneuve et Larose, 1970. 103 p. (Collection Techniques Agricoles et Productions Tropicales).
FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, esp. issue, p. 46-50, Aug. 1998.

FILIZOLA, H. F.; FERRACINI, V. L.; SANS, L. M. A.; GOMES, M. A. F.; FERREIRA, C. J. A. Monitoramento e avaliação do risco de contaminação por pesticidas em água superficial e subterrânea na região de Guaíra. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.5, p.659-667, 2002.

GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P.; PAUSTIAN, K.; ANTWERPEN, V. van. Simulation of soil carbon dynamics under sugarcane with the CENTURY Model. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 3, p. 802-811, 2007.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M. (Ed.). **Crop-water relations.** New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GOUVÊA, J. R. F.; SENTELHAS, P. C.; GAZZOLA, S. T.; SANTOS, M. C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical southern Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n. 5, p. 593-605, 2009.

INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant Soil**, Pretoria, v. 8, n. 2, p. 93–99, 1991.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de solos do Brasil.** Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php>. Acesso em: 28 jun. 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Projeto CANASAT.** Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/mapa.html>>. Acesso em: 13 set. 2011.

JOAQUIM, A. C.; BELLINARO, I. F.; DONZELLI, J. L.; QUADROS, A. C.; BARATA, M. Q. F. Potencial de manejo de solos cultivados com cana-de-açúcar. In:

SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 6., 1994, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: COPERSUCAR, 1994. p. 1-9.

JONES, C.A.; WEGENER, M.K.; RUSSELL, J.S.; MCLEOD, I.M.; WILLIAMS, J.R.; AUSCANE, D. **Simulation of Australian sugarcane with EPIC**. Brisbane: CSIRO Australia, Division of Tropical Crops & Pastures, 1989. 99 p. (CSIRO. Technical Paper, 29).

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

LAZINSKI, R. L. **Variabilidade da utilização do modelo Soygro para a região de Londrina, PR**. 1993. 98 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

LOGSDON, S. D.; RENEAU JR., R. B.; PARKER, J. C. Corn seedling root growth as influenced by soil physical properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 221-224, 1987.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; TSUIOSHI, Y. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. p. 115-118.

MARIN, F. R. **O clima e a eficiência da produção agrícola no estado de São Paulo**. Disponível em:
<http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/XIVCBA/CBAgro2005_14.pdf>. Acessado em: 18 ago. 2010.

MARIN, F. R.; LOPES-ASSAD, M. L.; ASSAD, E. D.; VIAN, C. E.; SANTOS, M. C. Eficiência da produção de cana-de-açúcar em duas safras no Estado de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.11, 2008.

MARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; JULLO JUNIOR, J. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia; Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. cap. 7, p. 109-130.

MAXIMILIANO, S. S. **Modelos para a previsão da 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.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 9, n. 3, p. 747-766, 1972.

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

PAULA, A. L. de. **Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar em ambiente protegido, sob diferentes níveis freáticos**. 2008. 150 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 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.; VILLA NOVA, N. A.; SENTELHAS, P. C. O parâmetro de Priestley Taylor para estimativa da evapotranspiração de referência na escala mensal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 83-87, 1997.

PEREIRA, P. A. A. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar, da Embrapa, exclui cultivos novos na Amazônia. **Jornal da Ciência**, Rio de Janeiro, jul. 2008. Disponível em: <<http://www.jornaldaciencia.org.br/Detalhe.jsp?id=57437>>. Acesso em: 29 out. 2009.

PERES, F. C. **Determinação dos coeficientes de cultura (Kc): ciclo de cana soca**. 1988. 94 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PÍCOLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.789-795, 2009.

PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. **Encarte do Informações Agrônômicas**, Piracicaba, n. 110, 65 p. jul. 2005.

_____. **Tabela de ambientes de produção de cana-de-açúcar da usina Jalles Machado**. Goianésia, 2010.

PRADO, H.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETO, R. A importância do conhecimento pedológico nos ambientes de produção de cana-de-açúcar. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E ÁGUA, 1., 2002, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: SBCS, 2002. 1 CD-ROM.

PRADO, H.; PÁDUA JUNIOR, A. L.; GARCIA, J. C.; MORAES, J. F. L.; CARVALHO, J. P.; DONZELI, P. L. Solos e ambientes de produção. In: DINARDO-MIRANDA, L. L. de; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. cap. 7, p. 179-204.

QURESHI, S. A.; MADRAMOOTOO, C. A.; DOODS, G. T. Evaluation of irrigation schemes for sugarcane in Sindh, Pakistan, using SWAP 93. **Agriculture and Water Management**, Amsterdam, v. 54, p. 37-48, 2002.

ROBERTSON, G. W. **Guidelines on crop-weather models**. Geneva: World Meteorological Organization, 1983. 115 p. (World Climate Application Programme, 50).

ROBERTSON, M. J.; INMAN-BAMBER, N. J.; MUCHOW, R. C.; WOOD, A. W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**. Amsterdam, v. 64, p. 211-227, 1999.

RUDOLFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M. Mapeamento da cana-de-açúcar na região Centro-Sul, via imagens de satélite. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 241, p. 79-86, nov./dez. 2007.

SANTOS, M. A.; CAMARGO, M. B. P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 1, p. 173-183, 2006.

SANTOS, V. R. **Crescimento e produção de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo**. 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2006.

SARTORI, M. M. P.; FLORENTINO, H. O.; BASTA, C.; LEÃO, A. L. Determination of the optimal quantity of crop residues for energy in sugarcane crop management using linear programming in variety selection and planting strategy. **Energy**, Amsterdam, v. 26, n. 11, p. 1031-1040, 2001.

SCARPARE, F. V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. 2011. 164 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SCARPARI, M. S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) através de parâmetros climáticos**. 2002. 94 p. Dissertação (Mestrado Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SCARPARI, M. S. **PREDPOL: um modelo de previsão de maturação de cana-de-açúcar visando planejamento otimizado**. 2007. 122 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. de (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. cap. 2, p. 19-36.

SIGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e a produção da cana-de-açúcar: avaliação do Modelo Mosicas**. 2006. 62 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SILVA, W. C. M. **Produtividade agroindustrial de genótipos RB de cana-de-açúcar da série 993 em 3 regiões de cultivo do Estado de Alagoas: estratificação de ambiente e análise de adaptabilidade e estabilidade.** 2004. 111 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2004.

SOUZA, E. F.; BERNADO, S.; CARVALHO, J. A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à água para três variedades em Campos dos Goytacazes. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.19, n.1, p.28-12, 1999.

TAIZ, L.; ZIEGER, E. **Fisiologia vegetal.** Trad. de E.R. Santarém et. al. 3. ed. Porto Alegre: Artemed, 2004. 719 p.

TERRAMOTO, E. R. **Avaliação e aplicação de modelos de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) baseados em parâmetros do solo e do clima.** 2003. 96 p. Tese (Doutorado em Fitoecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

THOMPSON, G. D. Water use by sugarcane. **South Africa Sugarcane Journal**, Petroria, v.60, n.11, p. 592-600, p.627-635, 1976.

THOMPSON, L. M.; Weather and technology in the production of soybeans in the Central United States. **Agronomy Journal**, Madson, v. 62, n. 2, p. 232-236, 1970.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance.** New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

TOLENTINO, G.; FLORENTINO, H. O.; SARTORI, M. M. P. Modelagem matemática para o aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar com menor custo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 729-735, 2007.

TREMOCOLDI, W. A. Mineralogia dos silicatos e dos óxidos de ferro da fração argila dos solos desenvolvidos de rochas basálticas no Estado de São Paulo. **Revista de biociências**, Taubaté, v.9, n.1, p.15-22, 2003.

VERED, E.; RAO, V.P. **Clima.** Disponível em: <<http://www.sugarcane crops.com/p/climate/>>. Acessado em: 14 jul. 2010.

VILLA NOVA, N. A.; PEREIRA, A. B. Ajuste do método de Priestley-Taylor às condições climáticas locais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 395-405, maio/ago., 2006.

VILLA NOVA, N. A.; RIPOLI, T. C. C. O futuro do palhço da cana-de-açúcar como grande fonte de energia elétrica no Brasil. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA DA AGRICULTURA, 2007, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2007.

WALKER, J. M. One-degree increment in soil temperature affects maize seedlings behaviour. **Soil Science Society of America Proceedings**, New York, v. 33, p. 729-7363, 1969.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. A modeling approach to determining the relationships between erosion and soil productivity. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, p. 129-144, 1984.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, Norwich, v. 2, p. 184-194, 1981.

WILSON, R. G.; ROUSE, W. R. Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 11, p. 436-443, 1972.

YAMADA, E. S. M. **Zoneamento agroclimático da *Jatropha curcas* L. como subsídio ao desenvolvimento da cultura no Brasil visando à produção de biodiesel**. 2011. 135 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2011.