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

**Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis
meteorológicas**

Nilceu Piffer Cardozo

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

**Piracicaba
2012**

Nilceu Piffer Cardozo
Engenheiro Agrônomo

**Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis
meteorológicas**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

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**

Cardozo, Nilceu Piffer

Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas / Nilceu Piffer Cardozo. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. - - Piracicaba, 2012.
201 p. : il.

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

1. Agrometeorologia - Modelagem 2. Análise de conglomerados 3. Análise multivariada 4. Cana-de-açúcar 5. Inovações tecnológicas I. Título

CDD 633.61
C268m

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

*Aos meus pais, irmãos e esposa
pelo exemplo, caráter e fé na família, no
trabalho e na vida.*

OFEREÇO

*“Talvez não tenhamos conseguido
fazer o melhor, mas lutamos para
que o melhor fosse feito. Não
somos o que deveríamos ser, não
somos o que iremos ser. Mas
graças a Deus, não somos o que
éramos”*

(Martin Luther King Jr.)

*Aos que acreditaram em mim,
cada um ao seu modo, em seu tempo.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, companheiro fiel nos melhores e piores momentos de minha vida.

Aos meus pais, aos quais simples palavras não podem representar o orgulho que sinto por ser seu filho.

Às minhas irmãs, por todo o apoio, carinho e afeto que sempre dedicaram a mim.

À minha esposa Renata, companheira nos bons e maus momentos da vida, por todo o amor, carinho e paciência ao me apoiar em todos os projetos que me proponho a concluir.

Ao Prof. Clóvis Alberto Volpe (*In Memoriam*), grande mestre e amigo, por ter apresentado a mim o fascinante mundo da agrometeorologia.

Ao Prof. Paulo Cesar Sentelhas, cuja amizade, apoio e compreensão foram decisivas para eu que pudesse realizar esse trabalho e todas as outras atividades que me propus a realizar em três anos de convívio.

Ao Prof. Luiz Roberto Angelocci pelo exemplo profissional e pessoal.

Ao Prof. Nilson Augusto Villa Nova por nos lembrar que pessoas e suas ideias são mais importantes que as ferramentas que elas sabem utilizar.

À todos os professores do PPG em Física do Ambiente Agrícola, com os quais tive contato, agradeço pelos ensinamentos passados.

Ao Luiz Fernando Novello e à Angela Márcia Derigi Silva por todas as vezes que “me salvaram” em momentos de dificuldade durante o mestrado.

Ao grande chefe, mestre e amigo Bernardo Yashuhiro Ide cujos ensinamentos transmitidos a mim foram muito além da experiência e conhecimento acumulados ao longo de sua carreira.

Ao Eng. Agr. Antônio Luiz Palhares, do Grupo Raízen, pelo dedicado trabalho realizado no planejamento, realização e organização dos dados que geraram esse trabalho.

Ao grande amigo Alan Rodrigo Panosso, grande cientista e pessoa, por todo o apoio dado para a realização desse trabalho.

Ao grande amigo Adriano Dicesar Martins de Araújo Gonçalves pela amizade, confiança e dedicação durante os anos de convívio na pós-graduação da ESALQ.

Aos amigos de pós-graduação do PPG em Física do Ambiente Agrícola, por todos os cafés na “cúpula” e momentos de descontração e amizade.

Aos amigos e companheiros de trabalho na área de Monitoramento de Qualidade das Operações Agrícolas do Grupo Raízen (representados por Maicon Rogério M. A. da Silva e Paulo Cruzado) por todo apoio e auxílio prestado no tempo em que trabalhamos juntos.

Aos amigos do Grupo Raízen do Pólo Jaú pelos 10 meses de convívio e grande aprendizado na Unidade Barra.

Aos amigos da Unidade Costa Pinto e do Corporativo Agrícola da Raízen pelo apoio e confiança no meu trabalho.

À CAPES pelos meses de concessão de bolsa e à ESALQ/USP pela oportunidade de cursar gratuitamente um programa de pós-graduação.

BIOGRAFIA

Nilceu Piffer Cardozo – nasceu em 3 de setembro de 1980, na cidade de Jaboticabal, estado de São Paulo. Em 1999 ingressou na Universidade Federal de São Carlos, no curso de Psicologia, formando-se com louvor em 2003. Em 2004 iniciou curso de Agronomia na UNESP de Jaboticabal, onde ao formar-se em 2008 recebeu o prêmio “Agronomia” pelo melhor trabalho de graduação. Trabalhou como estagiário em dois dos principais programas de melhoramento de cana-de-açúcar do Brasil (Instituto Agrônomo de Campinas e Centro de Tecnologia Canavieira). Em 2009 ingressou no mestrado do PPG em Física do Ambiente Agrícola da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, quando iniciou o presente trabalho, em modelagem da maturação da cana-de-açúcar. Possui especialização na cultura da cana-de-açúcar pelo Instituto Agrônomo de Campinas (2007), em Agronegócios pela FUNDACE/USP (2009) e Investimento e Gestão do Setor Sucroalcooleiro pelo PECEGE/ESALQ. Desde 2010 trabalha no Grupo Raízen (ex-grupo COSAN), onde participou de trabalhos de avaliação técnica do espaçamento alternado para a cana-de-açúcar e desenvolvimento de melhorias nas colhedoras JD-3522 na unidade Barra (Barra Bonita, SP). Atualmente, trabalha no corporativo agrícola da empresa em Piracicaba, atuando em nas áreas de desenvolvimento agrônomo, monitoramento agrometeorológico, modelagem de produtividade e avaliação de novos projetos.

SUMÁRIO

RESUMO.....	15
ABSTRACT	17
LISTA DE FIGURAS	19
LISTA DE TABELAS	27
1 INTRODUÇÃO	33
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
2.1 Importância da cana-de-açúcar no Brasil e no mundo	37
2.2 Cana-de-açúcar como matéria-prima.....	38
2.3 Modelagem matemática e seu uso na agricultura	40
2.3.1 Classificação de modelos matemáticos.....	41
2.3.2 Uso da modelagem no setor sucroalcooleiro	43
2.4 Maturação da cana-de-açúcar.....	46
2.4.1 Fisiologia da Maturação	47
2.4.1.1 Invertases e o controle de acúmulo de sacarose nos colmos	49
2.5 Principais fatores que influenciam a maturação da cana-de-açúcar	51
2.5.1 Maturação e características varietais	51
2.5.2 Indução floral e isoporização	52
2.5.3 Efeitos das condições meteorológicas na maturação da cana-de-açúcar.....	53
2.5.3.1 Temperatura do ar.....	54
2.5.4.2 Umidade do solo	57
2.5.3.3 Radiação solar e fotoperíodo	59
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
3.1 Caracterização da Área Experimental	61
3.2 Delineamento experimental.....	61
3.3 Tratos culturais.....	61
3.4 Amostragens e análises tecnológicas	62
3.5 Dados meteorológicos.....	67
3.6 Análise exploratória multivariada.....	69
3.6.1 Análise de agrupamento de cultivares	69

3.6.2 Análise de componentes principais entre variáveis meteorológicas e indicadoras de qualidade e produtividade da matéria-prima.....	70
3.7 Modelagem matemática da maturação da cana-de-açúcar	71
3.7.1 Análise estatística preliminar	71
3.8 Avaliação dos modelos com dados independentes	73
3.9 Aplicações do modelo em escala operacional: extrapolações para diferentes safras e regiões	74
4 RESULTADOS	77
4.1 Caracterização climática do local do experimento	77
4.2 Avaliação das cultivares	82
4.2.1 Efeito de épocas de plantio na produtividade e na maturação da cana-de-açúcar.....	82
4.2.2 Composição da cana-de-açúcar ao longo do ano	87
4.3 Análise exploratória multivariada	103
4.3.1 Análise exploratória multivariada das variáveis tecnológicas	103
4.3.2 Análise exploratória multivariada das variáveis tecnológicas e meteorológicas .	114
4.4 Correlações entre variáveis tecnológicas e meteorológicas	131
4.4.1 Correlações entre variáveis meteorológicas “simples” e variáveis tecnológicas.	131
4.4.1.1 Temperatura do ar	131
4.4.1.2 Precipitação	134
4.4.1.3 Umidade Relativa do ar e Déficit de Pressão de Vapor	136
4.4.1.4 Radiação solar, saldo de radiação, fotoperíodo e insolação.....	139
4.4.1.5 Velocidade do vento	143
4.4.2 Correlações entre variáveis meteorológicas “complexas” e variáveis tecnológicas	144
4.4.2.1 Graus-dia negativos, horas de frio e temperatura noturna.....	144
4.4.2.2 Déficit e excedente hídrico.....	147
4.5 Modelos descritivos da maturação da cana-de-açúcar.....	150
4.5.1 Seleção inicial das variáveis meteorológicas a serem utilizadas nos modelos...	150
4.5.2 Modelos para cultivares de ciclo precoce baseados em precipitação.....	151
4.5.3 Modelos para cultivares de ciclo médio baseados em precipitação.....	157
4.5.4 Modelos para cultivares de ciclo tardio baseados em precipitação	162

4.6 Avaliação dos modelos descritivos com dados independentes	168
4.6.1 Modelos para estimativa de valores de ATR	168
4.6.2 Modelos para estimativa de valores de Brix	170
4.6.3 Modelos para estimativa de valores de Pol%cana	172
4.6.4 Modelos para estimativa de valores de Fibra	174
4.6.5 Modelos para estimativa de valores de umidade	176
4.6.6 Considerações gerais acerca dos modelos avaliados	178
4.7 Aplicações do modelo em escala operacional: extrapolações para diferentes safras e regiões	181
5 CONCLUSÕES	191

RESUMO

Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas

O efeito das variáveis meteorológicas na maturação da cana-de-açúcar é um processo ainda pouco conhecido, apesar de apresentar inúmeros impactos à qualidade da matéria-prima para a indústria sucro-energética brasileira. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos das variáveis meteorológicas no processo de maturação de cultivares de cana-de-açúcar e gerar modelos capazes de descrevê-lo. O experimento foi realizado em área pertencente ao Grupo Raízen (ex-Cosan), em Piracicaba, SP, no período de março de 2002 a outubro de 2003. Foram avaliadas oito cultivares de cana-de-açúcar em 32 amostragens realizadas de março a outubro de 2003. Variáveis relacionadas à qualidade de matéria-prima da cana-de-açúcar (ATR, AR, ART, Pureza, Brix, Pol%cana, fibra e umidade) e variáveis meteorológicas (temperatura do ar, precipitação, radiação solar, entre outras) foram submetidas à análise estatística descritiva e multivariada, visando melhorar a compreensão do processo de maturação e suas relações com as condições ambientais. As variáveis meteorológicas de melhor correlação com as variáveis de qualidade da cana-de-açúcar foram utilizadas na elaboração de modelos descritivos do processo de maturação, os quais foram agrupados em precoces, médios e tardios, de acordo com o padrão de maturação das cultivares estudadas. A avaliação dos modelos foi realizada pela análise dos resíduos (presença de *outliers*, homogeneidade das variâncias e normalidade dos resíduos) e pela comparação com dados independentes (erros médios, R^2 , índice de concordância de Willmott e índice de confiança de Camargo). Independente do padrão de maturação (precoce, médias e tardias), os modelos de melhor desempenho foram aqueles que descreveram as variáveis ATR, Brix, Pol%cana e umidade, com valores de R^2 ajustado acima de 0,9 (p significativo a 1%) e ótimo desempenho segundo índice C de Camargo (acima de 0,85), quando testados com dados independentes. O modelo de fibra apresentou os menores valores de R^2 ajustado (em torno de 0,65) e não normalidade dos resíduos. Contudo, sua avaliação com dados independentes levou à obtenção de valores de índice C acima de 0,8. Os modelos gerados mostram que a precipitação pode ser utilizada como a principal variável na previsão da qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar e que seu uso pode ser estendido a outras áreas além daquela para onde foi inicialmente gerado.

Palavras-chave: *Saccharum* ssp.; Modelagem agrometeorológica; Análise tecnológica; Análise de agrupamento; Componentes principais

ABSTRACT

Modeling sugarcane ripening as a function of meteorological variables

The effect of meteorological variables on sugarcane ripening is a not very well known process in spite of the several impacts of that on the quality of the raw material for the sugarcane industry. The objective of this study was to evaluate the effects of meteorological variables on sugarcane ripening and based on that to establish models able to describe this process. The study was conducted in an area of the Raízen Group (former Cosan), in Piracicaba, state of São Paulo, Brazil, from March 2002 (planting) to October 2003. Eight sugarcane cultivars were evaluated by analyzing 32 samples collected from March to October 2003. Variables related to the quality of the raw material (ATR, AR, ART, Purity, Brix, Pol%cane, fiber and moisture) and weather (air temperature, rainfall, solar radiation, among others) were submitted to descriptive and multivariate statistical analysis in order to better understand the sugarcane ripening process and the relationship between this process and environmental conditions. The meteorological variables of best fit were used for elaborating the models to describe the ripening process, which were grouped into early, middle and late, according to the maturity pattern of the studied cultivars. The evaluation of the models was based on the analysis of residuals (presence of outliers, homogeneity of variances and normality of residuals) and on the comparison between estimated and independent data (mean errors, R^2 , agreement index of Willmott and confidence index of Camargo). Regardless of the pattern of sugarcane maturation (early, middle and late), the models that presented the best performance were for ATR, Brix, Pol% cane and humidity variables, with adjusted R^2 values above 0.9 (p significant at 1%) and excellent performance, with C index above 0.85, when evaluated with independent data. The fiber model had the lowest adjusted R^2 values (around 0.65) and problems in the distribution of its residuals (non-normality); however, when it was tested with independent data an acceptable performance was found, with C index above 0.8. The generated models showed that precipitation can be used as the main variable for predicting sugarcane quality and that its use can be extended to other areas than the one where it was originally generated.

Keywords: *Saccharum* ssp.; Agrometeorological modeling; Technological analysis; Cluster analysis; Principal components analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da maneira pela qual o efeito das variáveis meteorológicas foi considerado no estudo	71
Figura 2 - Variação mensal das temperaturas máximas, mínimas e médias em Piracicaba, São Paulo, durante o período de 1981-2010.....	77
Figura 3 - Precipitação mensal média de Piracicaba, São Paulo, durante o período de 1981-2010	78
Figura 4 - Balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, para o período de 1981 a 2010, para uma capacidade de água disponível de 100 mm e com evapotranspiração potencial estimada pelo método de Penman-Monteith	79
Figura 5 - Variação decendial dos valores de temperaturas máxima, média e mínima durante o período do experimento (2002-2003)	80
Figura 6 - Precipitação decendial durante o período experimental, de setembro de 2002 a dezembro de 2003, em Piracicaba, SP	81
Figura 7 - Balanço hídrico climatológico sequencial durante o período do experimento (2002-2003), em Piracicaba, SP, para uma CAD de 100 mm. As setas vermelhas indicam períodos de déficit hídrico e as azuis com chuva no início da estação seca	82
Figura 8 - Produtividade de colmos por hectare (TCH) ao longo da safra de 2003, em função do mês de plantio para diferentes cultivares de cana-de-açúcar (SP91-1049, SP86-155, SP90-3414 e SP87-365), cultivadas em Piracicaba, SP	83
Figura 9 - Produtividade de colmos por hectare (TCH) ao longo da safra de 2003, em função do mês de plantio para diferentes cultivares de cana-de-açúcar (RB867515, RB928064, SP83-2847 e SP86-42), cultivadas em Piracicaba, SP	84
Figura 10 - Teores de Pol%cana ao longo da safra de 2003 em função do mês de plantio para diferentes cultivares de cana-de-açúcar (SP91-1049, SP86-155, SP90-3414 e SP87-365), cultivadas em Piracicaba, SP	85
Figura 11 - Teores de Pol%cana ao longo da safra de 2003 em função do mês de plantio para diferentes cultivares de cana-de-açúcar (RB867515, RB928064, SP83-2847 e SP86-42), cultivadas em Piracicaba, SP	86

Figura 12 - Teores de açúcares redutores (AR, %), ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.....	87
Figura 13 - Teores de açúcares redutores totais (ART, %) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.....	89
Figura 14 - Teores de açúcares totais recuperáveis (ATR, kg.t ⁻¹) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP..	90
Figura 15 - Valores de Brix ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.....	92
Figura 16 - Teores de sacarose (Pol%cana) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.....	93
Figura 17 - Teores de Pureza (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.....	95
Figura 18 - Teores de fibra (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.....	97
Figura 19 - Umidade nos colmos (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.....	99
Figura 20 - Produtividade de colmos por hectare (TCH) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.....	100
Figura 21 - Produtividade de Pol por hectare (TPH) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.....	102
Figura 22 - Dendrogramas resultantes da análise de agrupamento por método hierárquico, construídos a partir de variáveis de qualidade da matéria prima de cultivares de cana-de-açúcar para cada mês da safra do ano de 2003, em Piracicaba, SP.....	104
Figura 23 - Balanço hídrico climatológico sequencial de janeiro a dezembro de 2003 em Piracicaba, SP. Setas vermelhas indicam déficit hídrico e azuis ocorrência de chuvas (diminuição do déficit hídrico)	105
Figura 24 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima das cultivares de cana-de-açúcar estudadas, no início de safra de 2003, em Piracicaba, SP	107

Figura 25 - Médias padronizadas das variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima no início de safra, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica <i>k-means</i> para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003, em Piracicaba, SP	109
Figura 26 - Médias padronizadas das variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima no meio de safra, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica <i>k-means</i> para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003, em Piracicaba, SP	110
Figura 27 - Médias padronizadas das variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima no final de safra, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica <i>k-means</i> para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003, em Piracicaba, SP	112
Figura 28 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP91-1049, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP	114
Figura 29 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP86-155, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP	116
Figura 30 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP87-365, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP	118
Figura 31 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP90-3414, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP	120
Figura 32 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar RB928064 e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP	122
Figura 33 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar RB867515, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP	124

Figura 34 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP83-2847, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP	126
Figura 35 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP86-42, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP	128
Figura 36 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre açúcar total recuperável (ATR) de cultivares precoces e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,92; $p < 0,01$)	152
Figura 37 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de ATR para cultivares precoces de cana-de-açúcar	152
Figura 38 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Brix de cultivares precoces de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9228; $p < 0,01$)	153
Figura 39 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Brix para cultivares precoces de cana-de-açúcar	153
Figura 40 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Pol%cana de cultivares precoces de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9240; $p < 0,01$)	154
Figura 41 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Pol%cana para cultivares precoces de cana-de-açúcar	154
Figura 42 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Fibra de cultivares precoces de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,4758; $p < 0,01$)	155
Figura 43 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Fibra para cultivares precoces de cana-de-açúcar	155
Figura 44 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre umidade de cultivares precoces de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9034; $p < 0,01$)	156
Figura 45 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de umidade para cultivares precoces de cana-de-açúcar.....	156

Figura 46 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre ATR de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9531; $p < 0,01$)	157
Figura 47 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de ATR para cultivares médias de cana-de-açúcar.....	158
Figura 48 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Brix de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9544; $p < 0,01$)	158
Figura 49 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Brix para cultivares médias de cana de açúcar	159
Figura 50 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Pol%cana de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9519; $p < 0,01$).....	159
Figura 51 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Pol%cana para cultivares médias de cana-de-açúcar.....	160
Figura 52 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre fibra de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,6701; $p < 0,01$)	160
Figura 53 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Fibra para cultivares médias de cana-de-açúcar.....	161
Figura 54 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre umidade de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,8857; $p < 0,01$).....	162
Figura 55 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de umidade para cultivares médias de cana-de-açúcar	162
Figura 56 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre ATR de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9531; $p < 0,01$)	163
Figura 57 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de ATR para cultivares tardias de cana-de-açúcar	164

Figura 58 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Brix de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9439; $p < 0,01$)	164
Figura 59 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de brix para cultivares tardias de cana-de-açúcar	165
Figura 60 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Pol%cana de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9470; $p < 0,01$)	165
Figura 61 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Pol%cana para cultivares tardias de cana-de-açúcar	166
Figura 62 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre fibra de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,61; $p < 0,01$)	166
Figura 63 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de fibra para cultivares tardias de cana-de-açúcar	167
Figura 64 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre umidade de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,8664; $p < 0,01$)	167
Figura 65 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de umidade para cultivares tardias de cana-de-açúcar	168
Figura 66 - Relação entre os valores de ATR observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Reta contínua apresenta proporção 1:1, com $a=0$ e $b=1$	169
Figura 67 - Relação entre os valores de Brix observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Reta contínua apresenta proporção 1:1, com $a=0$ e $b=1$	171
Figura 68 - Relação entre os valores de Pol%cana observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Reta contínua apresenta proporção 1:1, com $a=0$ e $b=1$	173

Figura 69 - Relação entre os valores de Fibra observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Reta contínua apresenta proporção 1:1, com $a=0$ e $b=1$	175
Figura 70 - Relação entre os valores de umidade observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Reta contínua apresenta proporção 1:1, com $a=0$ e $b=1$	177
Figura 71 - Variação mensal da temperatura mínima do ar durante o ano de 2002 nas regiões de Capivari, Jaú e Piracicaba, SP. Fonte: IAC e ESALQ/USP	180
Figura 72 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Piracicaba, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11	182
Figura 73 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Jaú, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11	183
Figura 74 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Jaboticabal, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11	184
Figura 75 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Ourinhos, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11	185
Figura 76 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Araçatuba, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11	186
Figura 77 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Igarapava, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11	187
Figura 78 - Relação entre a ATR observada e estimada pelo modelo pluviométrico para as regiões de Piracicaba, Jaú, Jaboticabal, Ourinhos, Araçatuba e Igarapava, São Paulo, durante as safras de 2005/06 a 2010/11	189

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis relacionadas à produtividade e à qualidade da matéria-prima das cultivares e variáveis meteorológicas utilizadas para análise de componentes principais.	71
Tabela 2–Classificação dos valores de desempenho do índice confiabilidade de Camargo para os modelos gerados.	74
Tabela 3- Teores de açúcares redutores (AR, %) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.	88
Tabela 4- Teores de açúcares redutores totais (ART, %) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.	89
Tabela 5 - Teores de açúcares totais recuperáveis (ATR, kg.t ⁻¹) ao longo dos meses de safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.	91
Tabela 6 - Valores de Brix ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.	92
Tabela 7 - Teores de sacarose (Pol%cana) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.	94
Tabela 8 - Teores de pureza (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.	96
Tabela 9 - Teores de fibra (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.	98
Tabela 10 - Umidade nos colmos (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.	100
Tabela 11 - Produtividade de colmos por hectare (TCH) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP.	101
Tabela 12 - Produtividade de Pol por hectare (TPH) ao longo dos meses de safra para oito cultivares de cana-de-açúcar.....	102
Tabela 13 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e produtividade da matéria-prima de oito cultivares de cana-de-açúcar, colhidas na safra de 2003, em Piracicaba, SP.	107

Tabela 14 - Agrupamento de cultivares segundo análise de agrupamentos não-hierárquica <i>k-means</i> para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003, em Piracicaba, SP.	108
Tabela 15 - Análise de variância das variáveis de qualidade da cana-de-açúcar dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos <i>k-means</i>	109
Tabela 16 - Agrupamento de cultivares segundo análise de agrupamentos não-hierárquica <i>k-means</i> para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003 em Piracicaba, SP.	110
Tabela 17 - Análise de variância das variáveis de qualidade da cana-de-açúcar dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos <i>k-means</i>	111
Tabela 18 - Agrupamento de cultivares segundo análise de agrupamentos não-hierárquica <i>k-means</i> para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003 em Piracicaba, SP.	112
Tabela 19 - Análise de variância para cada variável de qualidade da cana-de-açúcar dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos <i>k-means</i> ao final da safra.....	113
Tabela 20 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP91-1049, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP.	115
Tabela 21 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP86-155, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP.	117
Tabela 22 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP87-365, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP.	119
Tabela 23 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP90-3414, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP.	121
Tabela 24 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar RB928064, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP.	123

Tabela 25 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar RB867515, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP.....	125
Tabela 26 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP83-2847, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP.....	127
Tabela 27 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP86-42, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP.....	129
Tabela 28 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a temperatura máxima média (°C) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	131
Tabela 29 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a temperatura mínima média (°C) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	132
Tabela 30 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a temperatura média (°C) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	132
Tabela 31 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a amplitude térmica média (°C) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	133
Tabela 32 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a precipitação acumulada (mm) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	135
Tabela 33 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a umidade relativa máxima média (%) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	137
Tabela 34 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a umidade relativa mínima média (%) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	137

Tabela 35 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a umidade relativa média (%) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.	138
Tabela 36 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre o déficit de pressão de vapor (DPV, em kPa) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	139
Tabela 37 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a radiação solar global (Rg, em MJm ⁻² dia ⁻¹) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	140
Tabela 38 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre o saldo de radiação (Rn), em MJm ⁻² dia ⁻¹) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.....	140
Tabela 39 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre o fotoperíodo (N, em horas) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP.	141
Tabela 40 – Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a insolação (n) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas.....	142
Tabela 41 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a razão de insolação (n/N) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e os as variáveis tecnológicas analisadas.....	142
Tabela 42 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a velocidade do vento (u, em m.s ⁻¹) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP..	144
Tabela 43 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre o acúmulo de graus-dia negativos em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. Tb é a temperatura-base que propiciou o melhor ajuste.....	146
Tabela 44 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre o número de horas de frio (NHF) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis	

tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. Tb é a temperatura-base que propiciou melhor ajuste.	146
Tabela 45 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a temperatura noturna em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. Int. é o intervalo de tempo considerado para determinação da temperatura noturna, sendo que o Int. IV representa o intervalo que corresponde ao período das 21 h de um dia às 6h do dia seguinte.....	147
Tabela 46 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre o déficit hídrico acumulado em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicos analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. CAD é a capacidade de água disponível que gerou o melhor ajuste (mm).	148
Tabela 47 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre o excedente hídrico acumulado em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. CAD é a capacidade de água disponível que gerou o melhor ajuste (mm).	149
Tabela 48 - Valores de correlação linear de Pearson entre as variáveis selecionadas para elaboração dos modelos descritivos de maturação da cana-de-açúcar.....	150
Tabela 49 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros (kg.t^{-1}) relacionados à estimativa de valores de ATR pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP.....	170
Tabela 50 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros ($^{\circ}\text{Brix}$) relacionados à estimativa de valores de Brix pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP.....	172
Tabela 51 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros (%) relacionados à estimativa de valores de Pol%cana pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP.....	174

Tabela 52 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros (%) relacionados à estimativa de valores de Fibra pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP.	176
Tabela 53 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros relacionados à estimativa de valores de umidade pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP.	178
Tabela 54 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros (kg ATR.t ⁻¹ ; %) relacionados à estimativa de valores de ATR pelo modelo pluviométrico para as regiões de Piracicaba, Jaú, Jaboticabal, Ourinhos, Araçatuba e Igarapava, São Paulo, durante as safras de 2005/06 a 2010/11.	190

1 INTRODUÇÃO

Em função do aumento constante da demanda por açúcar e etanol em todo o mundo, os canaviais avançam, ocupando novas áreas nas regiões tradicionalmente produtoras, como o estado de São Paulo, e em outros estados onde a cultura não apresentava importância. Além dos tradicionais produtores, importantes grupos multinacionais têm investido no setor, motivados pelo destaque que o etanol tem recebido em todo mundo: fonte de energia mais barata, renovável e menos agressiva ao ambiente. Esses são alguns dos principais fatores que tornam o etanol tão atraente aos investidores e colocam o Brasil no centro das atenções mundiais.

Dessa forma, a cultura da cana-de-açúcar voltou a viver um novo período de euforia, o qual apresenta, além dos inegáveis reflexos econômicos, importantes efeitos na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para o setor. Operações de colheita e plantio mecanizados já são realidade e seu uso tende a ser ampliado com o lançamento de melhores adaptações das máquinas ao processo de cultivo. Além disso, novas cultivares são lançadas constantemente com o objetivo de propiciar aumento da produtividade em decorrência da maior resistência às doenças, às pragas e, principalmente, à seca. Com o avanço da cultura em direção às áreas do Cerrado, as resistências à seca e à baixa fertilidade dos solos tornaram-se as características mais importantes a serem trabalhadas nos programas de melhoramento, juntamente com a adaptação à mecanização (plantio e colheita) e melhores produtividades.

Todavia, embora vários avanços tecnológicos tenham sido alcançados pelo setor, existem muitas questões que ainda necessitam ser mais bem estudadas no que se refere ao cultivo dessa cultura. Um desses fatores que ainda não possui uma resposta satisfatória e carece de estratégias mais adequadas para seu manejo é a maturação da cana-de-açúcar e os efeitos do clima sobre esse processo. Nesse sentido, a safra de 09/10 foi um exemplo claro da carência de informações do setor canavieiro a respeito dos efeitos do clima na cultura da cana-de-açúcar. As chuvas intensas e acima da média histórica propiciaram cenário atípico, com consequências substanciais à qualidade da matéria-prima.

Nesse sentido, os estudos envolvendo a maturação de cana-de-açúcar indicam que variáveis meteorológicas, como baixas temperaturas e déficit hídrico moderado, associados à deficiência de nitrogênio, são os mais efetivos agentes de amadurecimento. Ao diminuírem as taxas de crescimento, menores são as quantidades de açúcares utilizados na formação de novos tecidos e maior é a quantidade de sacarose armazenada. Assim, durante o amadurecimento a percentagem de sacarose no colmo gradualmente aumenta enquanto a percentagem de glicose e frutose diminui.

Na região sudeste do Brasil, as reduções de temperatura observadas nos meses de outono-inverno, aliadas à ocorrência de déficit hídrico moderado, são os principais agentes da maturação, a qual geralmente alcança valores máximos no mês de agosto. Com a alternância das estações, um período prolongado de tempo frio irá retardar o crescimento e aumentar o acúmulo de sacarose mesmo que a cultura esteja bem suprida de nitrogênio e com umidade no solo. Todavia, mesmo em temperaturas mais baixas, chuvas ocasionais promovem redução nos teores de sacarose, fato que sugere que o amadurecimento depende de uma complexa combinação de variáveis do clima e do potencial genético da cultivar utilizada. Por ser um processo complexo e ainda pouco conhecido, estudos que auxiliem na compreensão dos fatores envolvidos na maturação da cana-de-açúcar podem propiciar melhor uso das cultivares existentes no mercado, trazendo retornos às empresas agrícolas, programas de melhoramento e à comunidade científica.

Diante disso, a hipótese geral deste trabalho é que variáveis meteorológicas, tais como precipitação, temperatura mínima, radiação solar e também a umidade do solo, afetam o processo de maturação da cana-de-açúcar de forma interativa e altamente relacionada com o genótipo avaliado. Com base nisso, a realização do presente estudo teve por objetivo avaliar os efeitos das variáveis meteorológicas na maturação de cultivares de cana-de-açúcar e dessa forma:

- 1) estabelecer as relações existentes entre as variáveis meteorológicas e aquelas relacionadas à qualidade da cana-de-açúcar, para diferentes cultivares e grupos de maturação;

2) estabelecer modelos descritivos dos efeitos de variáveis meteorológicas na maturação de algumas cultivares de cana-de-açúcar;

3) testar os modelos gerados com dados independentes, provenientes de seis safras em diferentes regiões do estado de São Paulo, de forma a verificar sua sensibilidade e confiabilidade em diferentes condições climáticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância da cana-de-açúcar no Brasil e no mundo

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma planta perene e própria de climas tropicais e subtropicais, sendo cultivada sob condições de sequeiro em regiões úmidas ou sob irrigação em regiões sub-úmidas, entre as latitudes de 35° N e S (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Seu centro de origem ainda é motivo de discussão, contudo regiões da Ásia são as mais citadas como prováveis berços da cana-de-açúcar (FIGUEIREDO, 2008). Nesse sentido, os locais onde mais se encontraram diversidade de algumas espécies de cana-de-açúcar são a Nova Guiné para *Saccharum officinarum* e *Saccharum robustum*, a China para a *Saccharum sinensis* e o norte da Índia para a *Saccharum barberi* (DANIELS; ROACH, 1987).

A hipótese mais aceita sobre a expansão da cana-de-açúcar é que ela tenha sido cultivada inicialmente na região do Golfo de Bengala e, paulatinamente, outros povos como persas, chineses, árabes foram conhecendo e expandindo seu cultivo. Os árabes tiveram ação marcante na primeira grande difusão da cana pelo mundo. Povos originários das regiões da Síria e do Iraque, em suas trajetórias de conquistas quando ocuparam o sul e o leste do Mediterrâneo levaram sua cultura, incluindo as plantas, entre as quais estava a cana-de-açúcar. Dessa forma, as grandes guerras foram responsáveis pela introdução e expansão da cana-de-açúcar na Europa e Oriente Médio (FIGUEIREDO, 2008).

No Brasil, sua introdução ocorreu na época da colônia, por volta de 1502. Contudo, nessa época o cultivo era limitado pela falta de mão de obra e pelo maior interesse econômico despertado pelo extrativismo da madeira e a descoberta de ouro e prata. Coube a Martin Afonso de Souza trazer mudas originárias da Ilha de Madeira, as quais se tornaram as precursoras do cultivo comercial nas capitanias. Com a expansão do cultivo da cana-de-açúcar nas Capitanias Hereditárias de São Vicente (São Paulo), Pernambuco, Bahia e Alagoas, teve início a agroindústria canavieira no Brasil (FIGUEIREDO, 2008).

Passados mais de 500 anos desde a sua introdução no Brasil, o setor canavieiro se desenvolveu enormemente, deixando de ser apenas produtor de açúcar, para tornar-

se produtor de álcool e energia. Nesse novo cenário, a cana-de-açúcar adquiriu grande importância, abandonando sua imagem de cultura de colônia. Cultivada em diversos países, a cana-de-açúcar é o foco das atenções mundiais por ser a matéria-prima de melhor rendimento na produção do etanol, uma opção de combustível menos poluente que os combustíveis fósseis, além de ser renovável. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com uma produção de 697,8 milhões de toneladas em 8,8 milhões de hectares (FNP, 2011). De toda cana-de-açúcar produzida no Brasil, cerca de 651,5 milhões de toneladas são empregadas na fabricação de açúcar e álcool, enquanto 46,3 milhões de toneladas são empregadas na fabricação de cachaça, de rapadura e demudas para a reforma dos canaviais. O segundo maior produtor mundial é a Índia, seguida pela China, Tailândia e Paquistão. Os Estados Unidos ocupam a décima posição, a qual deverá mudar em virtude dos incentivos dados pelo governo americano para a produção de combustíveis alternativos (FNP, 2011).

No Brasil, o maior produtor é o estado de São Paulo, o qual concentra cerca de 60% da produção nacional, com 395,7 milhões de toneladas em uma área de 4,7 milhões de hectares cultivados. Com a expansão da cultura no país, estados como Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, entre outros devem descentralizar a produção de cana-de-açúcar no Brasil, dado que a maioria das áreas tradicionalmente produtoras já alcançou seu limite em termos de área cultivada. Esse cenário já é observado desde a safra 2010/11, quando a produção na região Centro-Oeste (99,5 milhões de toneladas) ultrapassou a produção da tradicional região Nordeste (71,3 milhões de toneladas) (FNP, 2011).

2.2 Cana-de-açúcar como matéria-prima

Segundo Fernandes (2003), é preciso diferenciar os termos “cana” de “matéria-prima”. “Cana” diz respeito aos “colmos industrializáveis da cana-de-açúcar” e tem composição extremamente variável em função de diversos fatores, tais como: idade (cronológica e fisiológica), época de amostragem, cultivar, número do corte, sanidade, clima etc. Por sua vez, “matéria-prima” diz respeito ao material entregue na indústria para a fabricação de açúcar e álcool, o qual possui impurezas ou matéria-estranha

oriundas da própria cana (ponteira, folhas verdes/secas, raízes etc.), de plantas daninhas e do solo (pedras, terra etc.). Assim, a qualidade da cana-de-açúcar, enquanto matéria-prima industrial, pode ser definida por uma série de características intrínsecas da própria planta, alteradas pelo manejo agrícola e industrial, que definem seu potencial para a produção de açúcar e álcool (FERNANDES, 2003).

A eficiência do processo industrial de recuperação do açúcar depende da qualidade da matéria-prima entregue na unidade industrial. Sabe-se que a cana-de-açúcar submetida às operações finais da produção agrícola mantém suas características físico-químicas inalteradas por pouco tempo, necessitando, portanto, ser processada imediatamente após a sua recepção na unidade industrial, para evitar quedas de rendimento (VIANA, 2007).

A matéria-prima deve apresentar um conjunto de características que atendam ao processamento em uma dimensão mais ampla, como teor de impurezas, acidez volátil, açúcar total, “isoporização”, entre outros, estando diretamente ligada a um planejamento, incorporando serviços e custos. Sob o aspecto tecnológico, os colmos são constituídos de caldo e de sólidos insolúveis em água. Os sólidos insolúveis em água são representados pela fibra da cana, enquanto o caldo contém a água e os sólidos solúveis totais (açúcares e não-açúcares). Os sólidos solúveis são classificados em açúcares (sacarose, glicose e frutose) e em não-açúcares (orgânicos e inorgânicos), sendo sua medida denominada como Brix. Segundo Fernandes (2003), a natureza dos não-açúcares pode explicar as diferenças na composição tecnológica de uma matéria-prima em relação à outra similar durante o processamento e o próprio rendimento, em termos de extração de açúcar, durante o processo industrial.

Melhorias na qualidade da matéria-prima contribuem para a redução de custos, aumento dos rendimentos, das eficiências e da rentabilidade da empresa (STUPIELLO, 1993). Diante disso, modelos de previsão da qualidade da matéria-prima são ferramentas importantes para o setor canavieiro, pois permitem obter estimativas de produção ao longo da safra e, assim, adequar as alternativas de manejo e aumentar a eficiência das decisões gerenciais e estratégicas da empresa (SCARPARI, 2002; BOOTE et al., 1996).

2.3 Modelagem matemática e seu uso na agricultura

Modelo é uma palavra que admite várias conotações, dentre as quais podem ser mencionadas: (i) a representação de alguma entidade, geralmente em tamanho menor do que o original, (ii) uma descrição simples de um sistema, usada para explicá-lo ou para executar cálculos (CROWTHER, 1995). Pode-se notar, com base nas definições acima, que os modelos podem ser um protótipo, uma representação simplificada, bem como uma abstração de uma realidade (DOURADO NETO et.al, 1998). Modelos são representações teóricas para situações reais (CAIXETA FILHO, 2001), e tem por premissa que o estado de um sistema, assim como suas possíveis variações, podem ser quantificados e caracterizados a qualquer momento por equações matemáticas (DE WIT; GOUDRIAAN, 1974).

Segundo Ferreira (1999), modelos são conjuntos de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico, pelas quais se pretende explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades do sistema. Aris (1994) define modelos como sendo equações matemáticas representando fenômenos, podendo ser de entidade física, química, biológica, social ou conceitual. Cada pesquisador tem a sua própria imagem, uma visualização ou um simbolismo para obter um modelo do sistema com o qual trabalha. A elaboração de um modelo é apenas a formalização de seu conhecimento, a qual segue as regras básicas do método científico: (i) a observação de um sistema, (ii) a formulação de uma hipótese na tentativa de explicar as observações, (iii) previsão do comportamento do sistema por meio do modelo, (iv) a experimentação para testar a validade da hipótese (validação do modelo) (DOURADO NETO et al., 1998).

A aplicação de modelos matemáticos para simulação na agricultura é amplamente utilizada em diferentes setores (O'LEARY, 2000). Monteith (1996) definiu que modelos de simulação de cultura consistem em conjuntos de equações para estimar o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura a partir de coeficientes genéticos e variáveis ambientais, permitindo analisar diversos componentes da produção. Segundo Soler (2004), um modelo simula uma cultura pela estimativa do crescimento de seus componentes como folhas, raízes e caule. Dessa

forma, modelos de crescimento de cultura não somente estimam a biomassa total, mas também incluem informações sobre os processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento vegetal.

A simulação é importante para prever os resultados de um determinado sistema de gestão ou de uma determinada condição ambiental (WU et al., 1996). O fato de se conseguir prever produções tem efeito sobre a política agrícola, nos processos de comercialização, na forma de estoque, entre outros aspectos (SUGUITANI, 2006). A modelagem em sistemas agrícolas é uma ferramenta de pesquisa interdisciplinar que integra conhecimento de diversas áreas, permitindo o estudo e entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos da interação, e estimando a performance da cultura em diferentes situações (SOLER, 2004). Muitos modelos de culturas têm sido desenvolvidos para ajudar os pesquisadores a compreender o funcionamento de vários processos dentro dos sistemas agrícolas: avaliar alterações fisiológicas e o efeito na taxa fotossintética das plantas; prever a produção e eventuais quebras de safra; administrar a irrigação e a adubação; simular respostas da cultura a diferentes espaçamentos; prever impacto de mudanças climáticas na produção; otimização do planejamento de plantio, colheita e manejo da cultura; além de redução de gastos a experimentação (BOOTE et al., 1996; SUGUITANI, 2006; VAN ITTERSUM et al., 2003).

2.3.1 Classificação de modelos matemáticos

São inúmeras as classificações de modelos e seu uso depende da natureza do processo, da disponibilidade de dados e do conhecimento do pesquisador acerca do sistema representado. Embora possam ser classificados de inúmeras maneiras, os modelos mais utilizados são os empíricos e os mecanísticos (THORNLEY e JOHNSON, 2000). Modelos empíricos são fundamentalmente descrições diretas de dados observados. Os modelos empíricos consistem em analisar dados experimentais realizando análises dos mesmos e tentando idealizar equações matemáticas que se ajustam aos dados observados. Em um modelo empírico, todas as relações matemáticas são descritas a partir da observação do sistema, por dados experimentais ou por qualquer conhecimento da estrutura do sistema estudado (NASSIF, 2010). A

maioria dos sistemas públicos de previsão de safras em função do clima são baseados em modelos empíricos (DOURADO NETO et. al, 1998). Embora tais modelos sejam ferramentas analíticas úteis, são comumente criticados pela generalidade (capacidade de ser aplicado em condições diferentes daquelas para as quais foram obtidos). Segundo Teramoto (2003), quando o interesse é descrever primariamente a resposta de um sistema de forma geral, o método empírico pode ser utilizado satisfatoriamente. Neste caso, não há muito interesse em explicar detalhadamente o porquê de o sistema responder de tal forma.

Os modelos mecanísticos são relativamente mais complexos que os modelos empíricos e normalmente aplicados a uma maior gama de fenômenos (NASSIF, 2010). Baseiam-se na física e nos processos fisiológicos envolvidos no crescimento da cultura e, por este motivo, oferecem mais possibilidades para manipulação e melhoria do sistema (DOURADO NETO et. al, 1998). Wallach et al. (2001) afirmaram que, os modelos mecanísticos vem se tornando cada vez mais importantes nos últimos anos, sendo usados como ferramentas de ensino e pesquisa, bem como para auxiliar nas tomadas de decisão sobre o manejo de culturas. Modelos mecanísticos precisam respeitar a ordem dos processos e suas respectivas propriedades, analisando questões bioquímicas, fisiológicas e fenológicas. Pela síntese e integração do conjunto de equações que definem o sistema, chega-se então às variáveis de interesse para a cultura (NASSIF, 2010).

Os modelos mecanísticos, ao contrário dos empíricos, descrevem um sistema em termos dos mecanismos físicos, químicos e biológicos. Assim, um modelo pode ser constituído com base na estrutura do sistema, dividindo-o em componentes e descrevendo o comportamento desse sistema como um todo em termos do comportamento dos componentes individuais e suas inter-relações (VAN DAM, 2000). Contudo, deve ficar claro que, a um determinado nível de organização, todos os modelos são empíricos. Até mesmo um modelo mecanístico que simula o rendimento de uma cultura ao representar as relações entre todos os processos de plantas, certamente será, em algum nível, empírico. Por exemplo, quando relacionar a variação na taxa fotossintética bruta em função da temperatura (DOURADO NETO et. al, 1998).

2.3.2 Uso da modelagem no setor sucroalcooleiro

Para a indústria sucroalcooleira, modelos de simulação possuem aplicações para inúmeras questões da produção de cana-de-açúcar, principalmente relacionados à sua bioquímica (MOORE et al., 1997), agronomia, fisiologia e manejo de pragas e doenças (KROPFF et al., 1997), processo de moagem (WOOD, 1995; PEACOCK; STARZAK, 1996) e impacto ambiental em áreas vizinhas (KEATING et al., 1997). Modelos de simulação do crescimento da cana-de-açúcar permitem simular diferentes cenários e otimizar recursos financeiros e humanos, pelo melhor direcionamento de pesquisas no setor, além de aumentar o entendimento dos processos envolvidos no crescimento e produtividade. Contudo, o uso de modelos de simulação de crescimento ainda não é difundido no Brasil, especialmente no setor sucroalcooleiro (SUGUITANI, 2006).

Atualmente, a principal preocupação dos pesquisadores é obter melhorias na precisão e exatidão dos dados de saída da simulação, ou seja, nos valores de produtividade estimados. Todavia, a maior dificuldade na modelagem em cana-de-açúcar diz respeito à previsão da produção de sacarose, já que o rendimento varia anualmente de acordo com o manejo e com as condições edafoclimáticas (MUCHOW et al., 1997; ROBERTSON; DONALDSON, 1998). Assim sendo, melhorias na precisão e exatidão da previsão da produção de sacarose implicarão aumento na eficiência de produção e na moagem na indústria (O'LEARY, 2000). Com o intuito de superar essas questões, inúmeros modelos para estimativa da produtividade da cana-de-açúcar têm sido propostos com o objetivo final de simular a partição de biomassa em sacarose (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2009).

A década de 1970 marca o início do uso de modelos na cultura da cana-de-açúcar. Em mais de quarenta anos de trabalho, inúmeros modelos têm sido propostos, com os mais diversos enfoques. No Brasil, Ometto (1974) foi o pioneiro quando relacionou a estimativa da evapotranspiração potencial com o rendimento da cana-de-açúcar. Anos mais tarde, Machado (1981) apresentou um modelo matemático-fisiológico para simulação do acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar a partir de informações meteorológicas. Pereira e Machado (1986) propuseram o SIMCANA e Barbieri (1993) o MST, simuladores matemático-fisiológicos do crescimento

da cana-de-açúcar em função das condições ambientais. Barbieri (1993) desenvolveu um modelo matemático-fisiológico de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar. Esse modelo descreve o comportamento fisiológico da planta em resposta às condições ambientais, no qual elementos meteorológicos se relacionam com o desempenho da cultura, simulando o acúmulo potencial de matéria seca durante o ciclo. Além disso, Delgado-Rojas (1998) analisou os efeitos de variáveis climáticas, tais como precipitação, evapotranspiração, temperaturas máximas e mínimas na produtividade final da cana-de-açúcar e, utilizando a ferramenta de regressão linear múltipla pelo método “STEPWISE”, obteve equações matemáticas para estimativa da produtividade. Teramoto (2003) relacionou o modelo matemático para estimativa de produtividade relativa de cana-de-açúcar baseado em variáveis do solo (LEVY, 1995) e o modelo de produtividade potencial da FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), para simular a produtividade da cana-de-açúcar. Suguitani (2006) usou o modelo explanatório MOSICAS (MARTINÉ, 2003) para simulação de crescimento de quatro cultivares apresentando excelentes resultados com valores simulados para massa seca da parte aérea e índice de área foliar. Mais recentemente, Scarpari e Beauclair (2007) propuseram o PREDPOL, um modelo empírico desenvolvido para fornecer estimativas de ATR para algumas cultivares brasileiras de cana-de-açúcar.

Segundo O’Leary (2000), existem dois principais modelos de simulação de cana-de-açúcar atualmente em uso, excluindo os numerosos modelos de regressão utilizados em locais específicos de estudo. Esses modelos são o modelo Australiano APSIM-Sugarcane (KEATING et al., 1999) e o modelo Sul-Africano CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1997).

O modelo CANEGRO foi incluído no pacote DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) por ter sido largamente utilizado em diversos países (INMAN-BAMBER; KIKER, 1997; JONES et al., 2003). Tais modelos, embora demonstrem a importância da qualidade da matéria-prima, priorizam os processos de acúmulo de biomassa e não a maturação (O’LEARY, 2000). O modelo CANEGRO simula o crescimento da cana-de-açúcar usando informações de variáveis meteorológicas (radiação solar, precipitação, temperatura máxima e mínima do ar) e do solo (capacidade de campo, ponto de murcha permanente e profundidade do perfil do

solo). Com base em processo diário de crescimento da planta, CANEGRO inclui o desenvolvimento, a fenologia do dossel, o perfilhamento, o acúmulo de biomassa e sua partição, bem com o crescimento das raízes e o estresse hídrico (NASSIF, 2010).

O APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) inclui uma coleção de modelos denominados módulos e foi desenvolvido para simular processos biofísicos em sistemas de cultivo, em particular onde existe um interesse em resultados econômicos e ecológicos de práticas de gerenciamento em face aos riscos climáticos (KEATING et al., 2003). O modelo opera em escala diária e relaciona o crescimento da cultura em função da radiação interceptada, a qual produz fotoassimilados que são particionados entre os diversos órgãos da planta. O APSIM-Sugarcane foi concebido para simular a produção de cana, produção de sacarose, biomassa vegetal, uso da água, captação de nitrogênio pela cultura e para partição de carbono e nitrogênio, sendo o único modelo que simula as diferenças da cana-planta e cana-soca e teor de água do colmo (LISSON et al., 2005).

Há, no entanto, outro modelo, menos conhecido, também desenvolvido na Austrália (LIU e KINGSTON, 1995) que surgiu a partir da estrutura conceitual de Bull e Tovey (1974). Trata-se do QCANE (LIU e KINGSTON, 1995), um modelo que evoluiu de forma mecanicista com ênfase na fotossíntese, respiração e partição dos fotoassimilados. No QCANE todo fotoassimilado produzido diariamente é dividido em biomassa estrutural ou sacarose nas diferentes partes da planta. Este modelo tem por característica a simulação do uso da sacarose pela planta podendo ser utilizada como carbono estrutural ou na respiração de manutenção (SCARPARI, 2007). Segundo O'Leary (2000), um conceito interessante do modelo QCANE é que a área foliar é determinada a partir dos fotoassimilados particionados.

Embora a maioria dos modelos consiga prever a biomassa produzida, existem grandes dificuldades em prever a produção de sacarose (O'LEARY, 2000). Segundo Marin et al. (2011), a determinação da partição de biomassa em sacarose ainda é uma dificuldade, fato também ressaltado por Inman-Bamber et al. (2009), o qual atribui essa condição ao conhecimento insuficiente que se tem desse processo na planta como um todo. O conhecimento da produção de sacarose, ou seja, do grau de maturação da cana-de-açúcar permite o planejamento estratégico da colheita e a otimização do

retorno econômico da cultura. Inevitavelmente, o planejamento da colheita sendo otimizado ou não, utiliza estimativas de produção agrícola para dimensionar recursos e realizar cronogramas de execução e sequenciamento de operações (SALASSI et al., 2002), fatores que ressaltam ainda mais a importância de um conhecimento prévio da produção de açúcar por hectare.

2.4 Maturação da cana-de-açúcar

Clements (1962) descreveu a maturação da cana-de-açúcar como uma senescência fisiológica que ocorre entre as fases de crescimento e morte da planta. De forma geral, pode-se dizer que a maturação da cana-de-açúcar é o acúmulo de sacarose nos colmos (LEGENDRE, 1975), o qual ocorre a partir dos entrenós da base em direção ao ápice, até que atinjam um valor comum (ALEXANDER, 1973). Dessa forma, o colmo da cana constitui-se num reservatório onde, em condições favoráveis, é acumulada grande quantidade de sacarose. O colmo da cana é composto por sucessões de entrenós em diferentes estágios fisiológicos, emitidos em intervalos de aproximadamente 10 dias. Durante o crescimento, o teor de sacarose é maior nos entrenós basais e menor conforme se aproxima do ápice da planta. Os entrenós imaturos localizados na região do colmo com folhas verdes são fibrosos, com altas concentrações de hexoses e baixa concentração de sacarose. À medida que estes entrenós desenvolvem-se, sua taxa de crescimento diminui até ser praticamente nula quando o mesmo amadurece (GLASZIOU et al., 1965).

O ponto de maturação é determinado principalmente pelos teores de sacarose, açúcares redutores e umidade do colmo durante o ciclo da cultura. De acordo com as normas da CONSECANA (2006), a “cana-padrão”, em condições tecnológicas e econômicas de processamento industrial, deve apresentar o teor de sacarose (Pol%cana) de 12,257% (LAVANHOLI, 2008). Cultivares precoces são aquelas que apresentam Pol%cana superior a esse valor no início da safra, enquanto as médias e tardias apresentam valores a esse patamar a partir do meio da safra (LAVANHOLI, 2008). Todavia, os teores de sacarose variam ao longo da safra, com maiores taxas de acúmulo observadas durante a última fase do ciclo da cana, quando a planta tem

pequena taxa de crescimento, a qual é agravada pelas condições climáticas desfavoráveis (MACHADO, 1987). Dados relatados por Castro (2000) mostraram que a porcentagem de sacarose nos quatro meses antes da colheita aumentou de 4,5% para 13,7% ($\approx 200\%$) enquanto que a massa dos colmos aumentou somente de 95 para 99 t.ha⁻¹ ($\approx 5\%$). Assim, apesar do intenso trabalho dos programas de melhoramento para produzir cultivares de maior precocidade, a cana-de-açúcar raramente alcança seu pleno potencial de maturação, sendo colhida enquanto ainda acumula sacarose ativamente (LEGENDRE, 1975).

Segundo Alexander (1973), em termos fisiológicos, os processos de envelhecimento (idade), maturidade e maturação não são sinônimos, embora comumente sejam assim utilizados. De maneira geral, o termo maturidade apresenta diferentes significados para diferentes profissionais envolvidos com a cultura da cana-de-açúcar, sendo o mais correto defini-la como sendo a finalização botânica do colmo, tornando-o apto a produzir novos perfilhos em cada nó. Nesse caso, o colmo conterá açúcares armazenados para suportar a reprodução, mas seu potencial de armazenamento não foi, necessariamente, alcançado. Portanto, maturidade não é sinônimo de idade (envelhecimento), pois se os suprimentos de água e o nitrogênio são continuamente abundantes a planta pode nunca alcançar a maturidade independentemente de sua idade. Além disso, a maturidade também não é sinônimo de maturação, já que a cana-de-açúcar pode ser facilmente amadurecida em alguns meses após a brotação pela retirada de água, nutrientes ou qualquer outro fator necessário ao crescimento. Mas essas plantas não estarão, de forma alguma, maduras. De um ponto de vista cultural, contudo, os termos maturidade, idade e maturação tornaram-se intimamente ligados, de tal forma que o processo de maturação passou a ser convenientemente retratado como a culminação do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

2.4.1 Fisiologia da Maturação

A cana-de-açúcar é uma planta extremamente eficiente na utilização da radiação solar para a fotossíntese, sendo a faixa ótima de temperatura do ar para seu

desenvolvimento entre 25 a 34°C. Contudo, valores de temperatura do ar abaixo de 18°C parecem ser particularmente favoráveis para a partição de fotossintetizados na forma de sacarose (ALEXANDER, 1973). Uma vez produzida, a sacarose inicia seu transporte através do floema e, no final dele, sofre transformações nas células de armazenamento antes de se depositar no vacúolo. O processo de armazenamento inclui a inversão de sacarose, interconversão e fosforilação de glicose e frutose, síntese de sacarose fosfato e acúmulo ativo através do tonoplasto. Uma característica importante do processo de armazenamento é que a sacarose é movida contra um massivo gradiente de concentração. Para sair do vacúolo, a sacarose deve novamente passar pela inversão para a frutose e glicose (CASTRO, 2002; MOORE, 1995).

A síntese citosólica de sacarose é fortemente regulada pela frutose 2,6-bisfosfato. Esse composto é encontrado em concentrações mínimas no citosol e exerce um efeito regulador na interconversãocitosólica de frutose 1,6-bifosfato em frutose 6-fosfato. Baixa razão triose fosfato/ortofosfato no citosol promove a formação de frutose 2,6-bifosfato, que por sua vez inibe a hidrólise de frutose 1,6-bifosfato citosólica e aumenta lentamente a taxa de síntese de sacarose. Uma alta razão de triose fosfato/ortofosfato no citosol possui efeito oposto (ALEXANDER, 1973; MOORE, 1995).

Ao chegar à célula de armazenamento no parênquima, a sacarose é invertida por mediação de uma invertase ácida (β -frutofuranosidase, EC 3.2.1.26) situada na região externa da parede celular. Os produtos, frutose e glicose, prontamente se difundem para dentro da área metabólica, e com igual facilidade podem se difundir de volta para o meio externo dado o caráter passivo do processo. Os açúcares (sacarose, glicose e frutose) se deslocam para dentro do tecido de armazenamento, mas ainda não estarão armazenados porque não há impedimento para seu retorno, por difusão, ao meio externo (MOORE, 1995). No compartimento metabólico, a frutose e a glicose sofrem rápida interconversão e fosforilação. Devido à presença de alguns grupos de enzimas, são garantidas quantidades adequadas de UDPG, glicose 6-P e frutose 6-P, coenzimas essenciais para a síntese de sacarose, mesmo quando um dos açúcares é fornecido no meio externo. Entre as enzimas essenciais há hexoquinases (fosforilação de glicose e frutose), fosfohexoseisomerase (interconversão de glicose 6-P e frutose 6-P), sacarose fosfato sintetase (UDP-glicose:D-frutose-6-P 2-D-glucotransferase, EC 2.4.1.14),

sacarose sintetase (UDP-glicose:D-frutose 2-D-glicosiltransferase, EC 2.4.1.13), além de várias fosfatases não específicas e uma fosfatase específica para a sacarose fosfato. Juntas, essas enzimas catalisam a reconstituição da sacarose ou da sacarose-P, sendo a última hidrolisada pela sacarose-P fosfatase (ALEXANDER, 1973).

A sacarose-P pode ser transportada para o interior da célula, o que não ocorre com a sacarose devido à sua maior concentração dentro da célula. Esta é uma etapa ativa do acúmulo, que parece depender da energia liberada na quebra da ligação fosfato da sacarose-P. Ao chegar dentro do vacúolo de armazenamento, a sacarose é armazenada (MOORE, 1995; ALEXANDER, 1973). Independentemente da maturidade dos tecidos, o mecanismo de acúmulo ativo de sacarose parece ser o mesmo. Entretanto, o acúmulo de sacarose difere nesses tecidos devido à concentração de invertase e à necessidade de crescimento. Em tecidos de armazenamento ainda imaturos, onde a expansão celular é uma característica predominante, a sacarose acumulada é rapidamente hidrolisada pela invertase ácida vacuolar e as hexoses produzidas movem-se livremente até o citoplasma para serem utilizadas no processo de crescimento (TYMOWSKA-LALANNE; KREIS, 1998). Como parte do mecanismo cíclico, as hexoses podem, ainda, ser novamente acumuladas. Nos tecidos maduros do colmo, onde os processos de crescimento estão praticamente terminados, ocorre um grande declínio na concentração da invertase ácida vacuolar e, então, a invertase neutra se torna predominante (MOORE, 1995; GAYLER; GLASZIOU, 1972; ALEXANDER, 1973). A invertase neutra trabalha em conjunto com a invertase ácida de parede para governar o acúmulo ativo de sacarose no vacúolo. Em tecidos bem maduros, que apresentam teores de sacarose em torno de 15 a 20%, há um posterior armazenamento de sacarose nos espaços intercelulares. Este evento pode ocorrer por difusão passiva entre o espaço intercelular e o vacúolo, e por translocação para áreas de metabolismo intenso de açúcares (ALEXANDER, 1973; MOORE, 1995).

2.4.1.1 Invertases e o controle de acúmulo de sacarose nos colmos

As invertases têm função fundamental na partição dos fotossintetizados entre armazenamento e crescimento, sendo consideradas as enzimas reguladoras da

maturação da cana-de-açúcar (GLASZIOU; WALDRON, 1964; HATCH; GLASZIOU, 1963). A invertase ácida solúvel (SAI) é encontrada em grande quantidade nos vacúolos de tecidos jovens e sua concentração no vacúolo é dependente do balanço entre sua síntese e degradação. O processo de síntese da SAI é influenciado por reguladores vegetais (auxinas) e condicionada a um sistema de controle repressivo dependente da concentração de hexoses (frutose e glicose) no citoplasma (ALEXANDER, 1973; TYMOWSKA-LALANNE; KREIS, 1998). A alta concentração de hexoses no citoplasma age como bloqueio no processo de síntese da SAI, enquanto a baixa concentração de hexoses estimula sua síntese (MOORE, 1995).

De acordo com Vieira (1988), a atividade das invertases na cana-de-açúcar é influenciada pelas condições ambientais e pode resultar em crescimento desordenado, redução no acúmulo de sacarose e maturação retardada. Glasziou e Bull (1965) e Alexander (1973) relataram que níveis elevados de invertase ácida (pH ótimo 5,1) e baixos níveis de invertase neutra (pH ótimo 7) estão associados com vigoroso crescimento vegetativo enquanto o padrão oposto está associado à maturação. A SAI possui alta atividade em condições favoráveis ao crescimento e baixa em condições desfavoráveis, como sob estresse hídrico ou químico, fotoperíodo curto e temperaturas baixas (TYMOWSKA-LALANNE; KREIS, 1998; MACHADO, 1987). Lingle (1997) observou também que reduções na atividade da invertase ácida foram acompanhadas de aumento na concentração total de açúcar e sacarose, levando-a a concluir que esta enzima suprime o acúmulo de açúcar. Terauchi et al. (2000) relataram que a atividade da invertase ácida diminui sobre condições frias, provavelmente devido à maior atividade da sacarose fosfato sintetase e da invertase neutra, com consequente aumento na concentração de sacarose.

A quantidade de SAI vacuolar diminui gradativamente com a idade do entrenó, indicando ser ela influenciada negativamente pela maturação e pela redução na taxa de crescimento. Células de áreas em crescimento na região dos entrenós demonstraram maior atividade das invertases ácida e neutra do que células já expandidas e em zonas intermediárias, indicando que essas enzimas podem estar associadas com o processo de expansão celular do caule (SHETIYA e DENDSAY, 1991). Em contrapartida, Lingle e Smith (1991) concluíram que o processo de amadurecimento foi acompanhado de

redução na atividade das invertases ácidas, aumento na invertase neutra e redução na taxa de alongamento dos colmos. Este processo evidenciou um aumento na concentração de açúcar total nos entrenós do terço superior do colmo e um incremento no percentual de sacarose de açúcar total nos entrenós.

2.5 Principais fatores que influenciam a maturação da cana-de-açúcar

2.5.1 Maturação e características varietais

Brodie et al. (1969) sugeriram que o genótipo pode afetar a resposta da cana-de-açúcar às variáveis meteorológicas, tais como a temperatura, a precipitação, a umidade do solo e a radiação solar. Cultivares de cana-de-açúcar diferem quanto ao tempo que levam para alcançar a maturação, sendo que cultivares precoces tendem a ser mais sensíveis às condições meteorológicas, e, portanto, a amadurecer mais cedo. Enquanto isso, cultivares tardias são menos sensíveis às condições meteorológicas que levam à maturação, com o máximo teor de sacarose sendo atingido entre a segunda quinzena de agosto e a primeira quinzena de outubro, no estado de São Paulo (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004).

A variação na resposta das cultivares as condições ambientais é comumente atribuída às diferenças em sua fisiologia. Nesse sentido, Singh e Venkatarama (1983) e Lingle e Irvine (1994) observaram maiores taxas de crescimento relativo e de assimilação líquida de sacarose durante a elongação dos colmos e na maturação das cultivares precoces quando comparadas às cultivares tardias. Cultivares precoces tendem a produções mais sincronizada de perfilhos e a formar entrenós completamente desenvolvidos mais cedo. Mamet e Galwey (1999) sugeriram que as cultivares de maturação precoce são mais eficientes fisiologicamente, pois utilizam os fotossintatos de forma mais econômica e completam seu crescimento vegetativo mais rapidamente do que as cultivares de maturação tardia. Assim, elas estariam fisiologicamente aptas a mudar da fase de desenvolvimento vegetativo para maturação mais cedo que as cultivares tardias.

Além disso, em alguns trabalhos encontram-se relatos sugerindo que cultivares de maturação precoce tem uma maior razão entre invertase ácida e neutra,

favorecendo o processo de maturação (SINGH; VENKATARAMA, 1983). Viera et al. (1996a, 1996b) observaram que as cultivares de cana-de-açúcar apresentaram respostas diferentes em relação à atividade de invertases e teores de açúcar. Cultivares precoces tendem a apresentar altos níveis de atividade da invertase neutra mais rapidamente do que as cultivares tardias, resultando em grande acúmulo de sacarose e baixos teores de açúcares redutores.

2.5.2 Indução floral e isoporização

O florescimento da cana-de-açúcar tem sido encarado como prejudicial ao processo de acúmulo de sacarose, uma vez que a formação da panícula consome considerável quantidade das reservas da planta. As condições que propiciam a indução floral na região Sudeste do Brasil estão relacionadas ao fotoperíodo de 12,5 a 12 horas (em média entre 25 de fevereiro e 20 de março) e a valores de temperatura entre 31 °C (diurna) e 18 °C (noturna), além de bom suprimento de água (BARBIERI et al., 1981). A ocorrência de florescimento na cana-de-açúcar resulta na paralisação do crescimento vegetativo do colmo, diminuição do rendimento em açúcar devido à formação da folha bandeira, emissão de brotações laterais, redução do volume de caldo no período útil à industrialização e na quantidade de açúcar produzido por área (ALEXANDER, 1973; HUMBERT, 1968; DEUBER, 1988). Todavia, a intensidade do processo de florescimento e as consequências à qualidade da matéria-prima variam com a cultivar e com as condições climáticas vigentes.

Stehel (1955) demonstrou que em anos com alto índice de florescimento a sacarose, o Brix, a Pol e a pureza são menores que em anos de baixo índice de florescimento. Lopes-Hernandez (1965) observou que o efeito do florescimento manifesta-se nos seis entrenós superiores, sendo que do sétimo entrenó para baixo não há mudança na composição do colmo em virtude do florescimento. Nos seis entrenós superiores de plantas florescidas ocorreu diminuição de 17% no caldo extraído e, com isso, mesmo que tenha havido um teor de sacarose aparente 6,64% maior, houve redução de 5% no valor final de sacarose recuperada em função do aumento do teor de fibras e maior dificuldade para sua extração. Outro efeito relacionado ao possível

aumento de sacarose em canas florescidas ocorre devido ao fato de que, nesses casos (bem como em canaviais com maturação muito adiantada) os teores de dextrose excedem a quantidade de levulose no caldo, levando a leituras mais altas dos teores de sacarose do que seus valores reais. Em canas verdes ou pouco florescidas, entretanto, o conteúdo de levulose é maior que o da dextrose, fato que leva a leituras subestimadas dos teores reais de sacarose.

Outro importante aspecto relacionado ao florescimento refere-se ao fenômeno do isoporização ou chochamento, caracterizado pelo secamento do interior do colmo, principalmente de sua porção superior. A quantificação do grau de isoporização e das possíveis modificações na qualidade da matéria-prima pode fornecer dados de suma importância para o dimensionamento da área a ser plantada com cada cultivar, bem como os períodos mais indicados para a respectiva industrialização. Apesar de ocorrer diferenças entre cultivares, a isoporização das canas florescidas resulta em diminuição na porcentagem de caldo na cana e aumento no teor de fibras, com a consequente elevação na produção de bagaço. Embora o teor de sacarose do tecido isoporizado (parênquima sem caldo), seja próximo daquele da parte remanescente do colmo, sua extração pelos métodos convencionais é mais difícil e dispendiosa (LEITE, 2005).

2.5.3 Efeitos das condições meteorológicas na maturação da cana-de-açúcar

As variáveis meteorológicas são as principais responsáveis pela produtividade e qualidade da cana-de-açúcar (BARBIERI, 1993; KEATING et al., 1999). Alexander (1973) menciona que as plantas de cana-de-açúcar retardam seu ritmo de crescimento e intensificam o acúmulo de açúcar em condições naturais específicas de combinação da temperatura do ar e da umidade do solo. Assim sendo, na maioria das regiões tropicais e subtropicais, à medida que a cultura aproxima-se da colheita, a estação seca e as baixas temperaturas retardam o crescimento da cana-de-açúcar e forçam a conversão parcial dos açúcares redutores em sacarose (CLEMENTS, 1962). Contudo, a influência das condições meteorológicas no processo de maturação ainda é motivo de discussão e alguns autores propõem que, além da temperatura do ar e da

umidade do solo, variáveis como fotoperíodo e radiação solar também devam ser consideradas (LEGENDRE, 1975).

2.5.3.1 Temperatura do ar

A temperatura do ar está diretamente relacionada aos processos de crescimento vegetativo e maturação da cana-de-açúcar. Nesse sentido, Burr et al. (1957) observaram uma redução de 84% na taxa de fotossíntese da cana-de-açúcar quando a temperatura ambiente diminuiu de 23 para 13,6°C. Waldron et al. (1967) mostraram que a eficiência fotossintética diminuiu de forma linear com a diminuição da temperatura do ar em uma amplitude de 34 a 5°C. Os efeitos da temperatura do ar na taxa de fotossíntese e na eficiência desse processo estão diretamente relacionados ao desenvolvimento vegetativo da cultura (ALEXANDER, 1973). Nesse sentido, Stender (1924) mostrou uma íntima relação entre o comprimento e diâmetro dos colmos e a temperatura do ar, com redução na taxa de crescimento dos colmos durante o inverno a um terço da observada no verão. Mamet e Galwey (1999) mostraram que a redução na taxa de crescimento dos colmos, seja em comprimento ou em diâmetro, é acompanhada de aumento na taxa de acúmulo de sacarose nos colmos.

Alexander (1973) descreveu que o processo de maturação fisiológica da cana-de-açúcar depende da redução sazonal da temperatura do ar, a qual retarda a taxa de desenvolvimento vegetativo sem, porém, afetar significativamente o processo fotossintético, de maneira que haja maior saldo de produtos fotossintetizados transformados em açúcares para armazenamento nos tecidos da planta. Clements (1962) relatou que dois dos mais importantes fatores associados à maturação da cana-de-açúcar são o índice de umidade da bainha foliar na colheita e a temperatura média do ar dos três meses anteriores à colheita. Ambos os fatores mostram ter uma forte relação inversa com Brix, ou seja, quanto menor o índice de umidade e mais frias as noites, mais propícias às condições para a maturação. Yates (1972) encontrou que as baixas temperaturas promovem o amadurecimento mais efetivamente do que baixa disponibilidade de água no solo. Tais resultados também foram encontrados por Glover (1971), Saes et al. (1990) e Argeton (2006), os quais sugeriram que em locais onde não

há deficiência hídrica é necessário que a temperatura média seja inferior a 21 °C por três meses para que ocorra o repouso vegetativo e seja iniciado o processo de maturação.

Glasziou et al. (1965) mostraram que níveis relativamente altos de açúcar foram produzidos quando a temperatura do ar foi reduzida durante um longo período de tempo. Segundo esses autores, a concentração de açúcar não excedeu 12% de peso fresco quando a temperatura do ar foi mantida constante ou quando se promoveu pequenas variações diárias na mesma. Todavia, quando a temperatura média do ar foi reduzida durante um período relativamente longo de tempo (3 a 6 meses), a concentração de açúcar chegou as 17% de peso fresco. Os mesmos autores observaram, ainda, a ocorrência de perda de açúcar quando as plantas, que haviam alcançado altos níveis de sacarose, foram transferidas de ambientes com baixa temperatura para ambientes com alta temperatura. Contudo, os efeitos do aumento da temperatura do ar na redução dos níveis de sacarose foram observados após 35 dias de exposição, ou seja, o processo de redução dos níveis de sacarose foi bem mais rápido do que para seu acúmulo. Baseado nesses resultados, Glasziou et al. (1964) descartou a crença de que variações diárias na temperatura do ar são indutoras da maturação da cana-de-açúcar, além de sugerir que a planta é muito mais responsiva a fatores que favoreçam o crescimento vegetativo do que a maturação.

Segundo Scarpari (2007), há uma incongruência quanto à informação dos parâmetros térmicos da cana-de-açúcar, principalmente os relacionados à sua temperatura-base. Para dados obtidos em ambientes controlados, a temperatura-base é frequentemente calculada por meio da relação linear entre um sub-período de desenvolvimento da cultura e o intervalo de temperatura testado. No campo, entretanto, a determinação dos parâmetros térmicos é ainda mais complicada porque não há temperatura constante na qual a taxa de crescimento possa ser diretamente relacionada (LIU et al., 1999). Assim, inúmeros valores de temperatura-base foram propostos, os quais variaram de acordo com os locais, cultivares avaliadas e estágio de desenvolvimento.

Nesse sentido, Barnes (1964) encontrou que para a brotação dos toletes a temperatura-base é de 12°C, enquanto Inman-Bamber (1991, 1994) obteve para o

perfilhamento a temperatura-base de 16 °C. Já Bacchi e Souza (1977) consideraram tal valor entre 18 e 19 °C para o processo de alongação dos entrenós. Esse valor também foi encontrado por Liu et al. (1999), os quais trabalharam com duas cultivares de cana-de-açúcar. Autores como O'Callaghan et al. (1994) e Barbieri et al. (1977) consideraram temperaturas-base constantes para todos os processos e fases da cultura, iguais a 18 e 20 °C respectivamente.

Uma possível explicação para essa variação nos valores de temperatura-base é que em condições de campo, temperaturas mínimas ou máximas diárias ultrapassam o valor da temperatura-base. Nessas condições, os métodos existentes normalmente influenciam o acúmulo da soma térmica (LIU et al., 1999). Amplitudes térmicas diárias geram temperaturas máximas e mínimas distintas ao longo do período, entretanto podem gerar a mesma temperatura média. Este fato pode interferir na determinação da temperatura-base, com valores distintos sendo encontrados para um mesmo local. Além disso, o processo de aclimação ao frio desenvolvido pelas plantas implica em numerosos efeitos fisiológicos e bioquímicos, os quais modificam a sensibilidade das plantas às baixas temperaturas e, dessa forma, o crescimento pode ou não ser interrompido (XIN; BROWSE, 2000).

No caso da maturação, Scarpari (2004, 2007) consideraram que temperaturas abaixo de 20 °C retardam a taxa de crescimento da cana-de-açúcar e proporcionam acúmulo de sacarose em seus colmos. Como a maturação está relacionada à redução da temperatura do ar, Scarpari (2002) e Scarpari e Beauclair (2004) propuseram um método para correlacionar tais variáveis, o qual foi denominado de soma de graus dias negativos. Esse método assemelha-se ao conceito de horas de frio, o qual é entendido como o tempo, em horas, em que a temperatura do ar permanece abaixo da temperatura-base para quebra de dormência em algumas espécies (BURIOL et al., 2000).

Segundo Scarpari (2007), é preciso considerar que, no caso da cana-de-açúcar, temperaturas entre 7 e 0 °C não devem ser consideradas no cálculo de graus-dia negativos. Além disso, deve-se descontar 0,47 nos graus-dia negativos acumulados a cada grau abaixo de 7 °C, o que se faz necessário pois temperaturas inferiores a essa afetam a assimilação de carbono, a condutância estomática e a taxa fotossintética,

determinando a magnitude de troca gasosa do dia seguinte, reduzindo também a translocação noturna de sacarose para os colmos (GRANTZ, 1989; WALDRON et al., 1967), existindo um acúmulo de sacarose nas células das folhas na tentativa de diminuir o potencial mátrico e a temperatura de congelamento.

2.5.4.2 Umidade do solo

Além da temperatura do ar, a umidade do solo também pode afetar o processo da maturação. Em áreas tropicais, onde a temperatura não limita o crescimento, o amadurecimento é induzido pela exaustão dos suprimentos de nitrogênio e, principalmente, da água armazenada no solo (ALEXANDER, 1973; TIANCO, 1970; HUMBERT, 1968). O estresse hídrico influencia a taxa fotossintética ocasionando severa redução na síntese de carboidratos, na expansão foliar e na elongação dos entrenós. Com isso, há aumento no conteúdo de sacarose, devido à reduzida demanda de fotoassimilados nas regiões meristemáticas (ALEXANDER, 1973).

Embora déficits hídricos provoquem as alterações citadas, o impacto no rendimento final pode ser pequeno, devido ao pouco tempo de exposição e à habilidade da planta em produzir novas folhas e colmos em condições úmidas subsequentes (WIEDENFELD, 2000). Nesse sentido, Inman-Bamber (2004) concluiu que o acúmulo de biomassa nos colmos é afetado quando o déficit hídrico é superior a 120 mm, enquanto o acúmulo de sacarose é afetado apenas com déficit hídrico superior a 145 mm. Scarpari e Beauclair (2004) também relataram que uma seca superior a 130 mm nos meses que antecedem a colheita influenciam positivamente o acúmulo de sacarose no colmo.

Todavia, o déficit hídrico ideal para esse processo ainda não está devidamente esclarecido, já que esse valor depende também de outras variáveis, tais como taxa de evapotranspiração, da capacidade de água disponível (CAD) e da fase fenológica da cultura (SCARPARI, 2007). Muitas pesquisas prévias sobre o déficit hídrico em cana-de-açúcar tem se concentrado em períodos mais tardios do ciclo da cultura, particularmente com respeito ao manejo de suspensão da irrigação e suas consequências para a produção de biomassa e açúcar (THOMPSON, 1977;

ROBERTSON; DONALDSON, 1998). Assim, há necessidade do melhor entendimento das consequências da variação do momento de aplicação e da duração do déficit hídrico durante os primeiros estádios de desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar na produção de biomassa e de açúcar.

Um grande número de estudos descreve os efeitos do déficit hídrico em processos como expansão foliar e dos colmos (HILL, 1966; KINGSTON; HAM, 1975; JONES, 1980; KOEHLER et al., 1982; INMAN-BAMBER; DE JAGER, 1988; ROBERTS et al., 1990; NABLE et al., 1999); senescência foliar (INMAN-BAMBER; DE JAGER, 1988; INMAN-BAMBER, 1994); conteúdo de sacarose e matéria seca (INMAN-BAMBER; DE JAGER, 1988) e fotossíntese (ROBERTS et al., 1990). Contudo, nenhum estudo conseguiu integrar os efeitos do déficit hídrico nos estádios iniciais da cultura com os processos de crescimento e produtividade final (ROBERTSON et al., 1999).

Robertson et al. (1999) mostraram a inexistência de efeito do déficit hídrico na produção de biomassa de cana-de-açúcar quando ocorrido no início da fase de perfilhamento. Há um crescimento compensatório da cultura submetida ao déficit hídrico no início de seu desenvolvimento, quando submetidas à irrigação após a ocorrência do mesmo. Assim, os efeitos deletérios do déficit hídrico podem ser compensados pelo aumento na taxa de perfilhamento e aparecimento de novas folhas se a planta for exposta a condições hídricas satisfatórias (ROBERTSON et al., 1999). Nesse sentido, Inman-Bamber (1994) mostrou que plantas de cana-de-açúcar submetidas à irrigação após a ocorrência de déficit hídrico, apresentaram aumento em sua taxa de alongação de colmos de até 1,6 vezes em comparação às plantas não submetidas à restrição hídrica. Contudo, o déficit hídrico imposto quando a cultura encontra-se na fase de crescimento rápido (alongação dos entrenós) promoverá impactos mais deletérios à produtividade final de biomassa (de colmos e total) e de açúcar por tonelada de cana.

Os efeitos observados com déficits hídricos impostos nas fases de perfilhamento e alongação dos colmos contrastam com a resposta encontrada no tratamento com déficit mais tardio, imposto próximo a colheita. Quando o déficit hídrico ocorre próximo à colheita, a concentração de sacarose pode aumentar em até 15%, sendo o aumento médio de cerca de 8% (ROBERTSON; DONALDSON, 1998). Segundo os autores, o aumento na concentração de sacarose ocorreu devido a um aumento nos sólidos

solúveis e desidratação. Todavia, esse aumento na produção de sacarose ocorreu quando a redução no peso de matéria seca dos colmos foi menor do que 10%. Segundo Robertson e Donaldson (1998), essa relação pode constituir as bases para a determinação do limiar entre a redução na massa de colmos e a produção de sacarose sob vários regimes de suspensão da irrigação (*drying-off*), e o desenvolvimento de um ponto econômico ótimo para a severidade dessa suspensão.

2.5.3.3 Radiação solar e fotoperíodo

Ao analisar diferenças no crescimento e maturação de cultivares de cana-de-açúcar em duas localidades no Havaí, Clements (1940), concluiu que diferenças marcantes na produção foram devidas mais à radiação solar do que aos efeitos da temperatura, e que dias nublados representam fator limitante à maturação. Clements (1940) notou que níveis de sacarose foram maiores em áreas onde a radiação solar foi mais intensa (devido à ausência de nuvens), apesar de a umidade do solo nas duas áreas ser a mesma nos três meses que antecederam a colheita. Legendre (1975) também relatou que a radiação solar esteve mais diretamente relacionada à maturação da cana-de-açúcar do que fatores como temperatura do ar e precipitação. Contudo, a influência da radiação solar esteve altamente relacionada a características das cultivares, o que levou o autor a ressaltar a importância da interação entre os genótipos e as variáveis meteorológicas.

Vários pesquisadores (ALEXANDER, 1973; GLASZIOU et al., 1964; SHAW, 1953) demonstraram a importância do fotoperíodo na maturação da cana-de-açúcar. Shaw (1953) relatou que valores máximos de acúmulo de sacarose foram encontrados nas latitudes de 18°N e 18°S e sugeriu que esse efeito era devido muito mais à duração do dia (fotoperíodo) ao longo do período crítico à maturação do que à temperatura do ar. Entretanto, Glasziou et al. (1965) sugeriu que os efeitos observados por Shaw (1953) foram devidos a uma combinação ótima entre as variações sazonais na temperatura do ar e na duração do fotoperíodo nesses locais. Em latitudes muito próximas à linha do Equador a variação na temperatura do ar pode ser muito pequena para favorecer a maturação da cana-de-açúcar, enquanto em médias latitudes a

duração do dia durante o inverno pode ser muito curta, desfavorecendo o processo de acúmulo de açúcar (diminuindo o período disponível para realização da fotossíntese). Glasziou et al. (1965) encontraram ainda que a duração do fotoperíodo é importante para estimular o crescimento e acúmulo de matéria-seca nos colmos, sendo a temperatura do ar responsável pela partição da matéria-seca em órgãos vegetativos (altas temperaturas) ou de reserva (baixas temperaturas).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área Experimental

Os dados empregados no presente estudo foram obtidos de um experimento realizado em área pertencente à Usina Costa Pinto, de propriedade do Grupo Raízen (ex-COSAN), localizada no município de Piracicaba, SP, durante os anos de 2002 e 2003. O clima local é subtropical úmido de acordo com a classificação de Köppen, com verão chuvoso e inverno seco. O clima da região, de acordo com os valores médios anuais do período de 1981 a 2010, apresenta chuva total anual de 1.325 mm, temperaturas máxima, mínima e média de 28,2°C, 14,9°C e 22,6°C, respectivamente, e umidade relativa média do ar de 73,1%. O mês mais frio é julho com temperatura média de 17,5°C, e o mês mais quente é fevereiro com temperatura média de 24,7°C. O mês mais chuvoso é janeiro com um total de 229 mm, e o mês menos chuvoso é julho com 29,1 mm. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (EMBRAPA, 2006).

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial (oito cultivares, 6 datas de plantio e 8 épocas de amostragem) com 3 repetições por tratamento. Cada parcela constou de 4 linhas de 15 m, com espaçamento de 1,4 m. As datas de plantio ocorreram por volta do décimo quinto dia dos meses de maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro de 2002. Foram avaliadas oito cultivares de cana-de-açúcar pertencentes aos grupos de maturação precoce, média e tardia, sendo elas: SP91-1049, SP86-155, SP87-365, SP90-3414, RB867515, RB928064, SP86-42 e SP83-2847.

3.3 Tratos culturais

Os plantios das cultivares foram realizados de forma idêntica ao que é comumente feito nas unidades do Grupo Raízen. O preparo do solo consistiu na

destruição da soqueira anterior, seguida de operações de gradagem e subsolagem. A correção do solo foi realizada com aplicação de $2,5 \text{ t.ha}^{-1}$ de calcário, $2,0 \text{ t.ha}^{-1}$ de gesso e fosfatagem com 220 kg.ha^{-1} de Super Fosfato Triplo. O solo preparado e corrigido foi, então, sulcado em espaçamento de 1,4 m com adubação de 500 kg.ha^{-1} da fórmula 05-25-25. As mudas de cada cultivar foram então distribuídas manualmente nos sulcos e, em seguida, procedeu-se a “picação” dos colmos. No momento da “cobrição” foram realizadas aplicações de inseticida (250 g.ha^{-1} de Regent 800 WG) e nematicida (6 l.ha^{-1} de Furadan 350 SC). O controle de plantas daninhas envolveu realização de capinas até que a cultura apresentasse fechamento das entrelinhas.

3.4 Amostragens e análises tecnológicas

As amostragens foram realizadas mensalmente em torno da segunda semana de cada mês, tendo início no mês de março e se estendendo até outubro de 2003. As amostragens consistiram na coleta de 10 colmos de cada cultivar, os quais foram cortados na base e tiveram sua palha e folhas verdes (ponteiro) retiradas. As amostragens sempre foram realizadas nas linhas centrais de cada parcela, de forma a isolar os efeitos de bordadura. Em cada amostra foram feitas três repetições das análises tecnológicas, ou seja, foram retirados 30 colmos por cultivar em cada amostragem. O material coletado foi encaminhado para a unidade industrial onde foram realizadas as análises tecnológicas para a determinação das seguintes variáveis, segundo as normas do CONSECANA (2006):

- **Peso do bagaço (bolo) úmido (PBU)**

O peso do bagaço (bolo) úmido utilizado para o cálculo da fibra da cana (F) foi obtido em balança semi-analítica.

- **Brix (B)**

A determinação do Brix (teor de sólidos solúveis por cento, em peso, de caldo) foi realizada em refratômetro digital, de leitura automática, com correção automática de temperatura, com saída para impressora e/ou registro magnético e resolução máxima

de 0,1ºBrix (um décimo de grau brix), com o valor final expresso à 20 °C (CONSECANA, 2006).

- **Pol do caldo (S)**

A leitura sacarimétrica do caldo foi determinada em sacarímetro digital, automático, com peso normal igual a 26 g, resolução de 0,01 °Z e calibrado a 20 °C, em comprimento de onda de 587 e 589,4 nm, provido de tubo polarimétrico de fluxo contínuo e com saída para impressora e/ou registro magnético de dados, após clarificação do caldo com mistura clarificante à base de alumínio (CONSECANA, 2006). A pol do caldo (S) (teor de sacarose aparente por cento, em peso, de caldo) foi calculada pela equação seguinte:

$$S = LPb \times (0,2605 - 0,0009882 \times B) \quad (1)$$

em que: LPb corresponde à leitura sacarimétrica equivalente à de sub-acetato de chumbo; B é o brix do caldo. A LPb é obtida pela seguinte equação:

$$LPb = (1,00621 \times LAI + 0,05117) \quad (2)$$

sendo LAI a leitura sacarimétrica obtida com a mistura clarificante à base de alumínio.

A partir desses valores foram estimadas as seguintes variáveis:

- **Pureza aparente do caldo (Q)**

A pureza aparente do caldo (Q), definida como a porcentagem de pol do caldo (S) em relação ao Brix do caldo (B), foi calculada pela equação:

$$Q = \left(\frac{S}{B} \right) \times 100 \quad (3)$$

- **Açúcares redutores do caldo**

O teor de açúcares redutores por cento, em peso, de caldo foi calculado pela equação:

$$AR \% \text{ caldo} = 3,641 - 0,0343 \times Q \quad (4)$$

em que Q é a pureza aparente do caldo, expressa em porcentagem.

- **Fibra da Cana-de-açúcar (F)**

A fibra da cana (F) foi calculada pela equação:

$$F = (0,08 \times PBU) + 0,876 \quad (5)$$

em que PBU é o peso do bagaço úmido da prensa, em gramas.

- **Coeficiente “C”**

O coeficiente “C”, utilizado para a transformação da Pol do caldo extraído pela prensa (S) em Pol da cana (Pol%cana), foi calculado em função da fibra (F), pela seguinte fórmula:

$$C = [1,0313 - (0,00575 \times F)] \quad (6)$$

- **Pol da cana-de-açúcar (Pol%cana)**

A Pol da cana (Pol%cana) foi calculada pela equação:

$$Pol\%cana = [S \times (1 - 0,01 \times F) \times C] \quad (7)$$

em que: S é a Pol do caldo; F é a fibra da cana; C é coeficiente de transformação da pol do caldo extraído pela prensa (S) em Pol da cana (Pol%cana).

- **Açúcares redutores da cana (AR)**

O cálculo dos açúcares redutores da cana (AR) foi feito pela equação:

$$AR = AR\%caldo \times (1 - 0,01 \times F) \times C \quad (8)$$

em que: AR%caldo corresponde aos açúcares redutores do caldo e C é o coeficiente de transformação da Pol do caldo extraído pela prensa (S) em Pol de cana (Pol%cana).

- **Açúcar total recuperável (ATR)**

O ATR foi calculado pela equação:

$$ATR = (10 \times Pol\%cana \times 1,05263 \times 0,915) + (10 \times AR \times 0,915) \quad (9)$$

em que: $10 * Pol\%cana$ = Pol por tonelada de cana; 1,05263 = coeficiente estequiométrico para a conversão de Pol em açúcares redutores; 0,915 = coeficiente de recuperação, para uma perda industrial de 8,5%; $10 * AR$ = açúcares redutores por tonelada de cana.

- **Açúcares redutores totais % caldo (ART)**

A estimativa dos açúcares redutores totais do caldo foi feita com base nos açúcares redutores da cana (AR) e no Pol da cana (Pol%cana), por meio da seguinte equação:

$$ART = AR + \frac{Pol\%cana}{0,95} \quad (10)$$

- **Umidade % cana (U%C)**

O cálculo da quantidade percentual de água presente na amostra foi calculada pela seguinte equação:

$$U\%C = 100 - F - [B \times (1 - 0,01 \times F)] \quad (11)$$

em que: F é a fibra da cana; e B é o valor de Brix.

Além disso, foi determinada a massa dos 10 colmos colhidos para cada uma das três repetições que compunham uma amostra. A partir desses valores calculou-se:

- **Produtividade de cana (TCH)**

A produtividade de toneladas de colmos por hectare (TCH) foi calculada pela equação a seguir:

$$TCH = \frac{\left[\frac{(10000)}{E} \times N \times P \right]}{1000} \quad (12)$$

em que: E corresponde ao espaçamento entre sulcos de plantio; N é o número de perfilhos por metro; P é a massa (kg) dos 10 colmos amostrados.

- **Produtividade de Pol por hectare (TPH)**

A produtividade de Pol por hectare foi calculada de acordo com a equação a seguir:

$$TPH = \frac{(TCH \times Pol\%cana)}{100} \quad (13)$$

em que: TCH é a produtividade de colmos por hectare, em toneladas, e Pol%cana é a Pol da cana, expressa em %.

Essas informações foram analisadas de forma a melhor compreender a variação das variáveis tecnológicas ao longo dos meses de amostragem, comparando-se os valores obtidos entre as épocas de plantio e entre as cultivares de diferentes grupos de maturação, e realizada a estatística descritiva (média, desvio padrão e coeficiente de variação) mensal entre os valores obtidos pelas cultivares.

3.5 Dados meteorológicos

Os dados de meteorológicos utilizados nesse estudo, foram obtidos junto ao banco de dados do posto meteorológico do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), em Piracicaba, SP (22°42’30” de latitude sul; 47°30’00” de longitude oeste; com elevação média 546 m acima do nível médio do mar). Foram utilizados dados diários, relativos aos anos de 2002 e 2003, das seguintes variáveis: temperatura do ar (máxima, média e mínima); radiação solar global; saldo de radiação; fotoperíodo; insolação; umidade relativa do ar (máxima, média e mínima); e precipitação. A partir dessas informações, foram determinadas variáveis como número de horas de frio, graus-dias negativos, temperatura noturna, amplitude térmica, déficit de pressão de vapor (DPV), déficit e excedente hídrico acumulados.

Na determinação do número de horas de frio (NHF) foram avaliados os valores de 10 a 22°C, para a seleção daquela que melhor representasse a temperatura-base de cada cultivar avaliada. Para tanto, utilizou-se dados de temperatura média do ar, obtidos em intervalos de 15 minutos. O número de horas de frio foi obtido por meio da contagem das horas em que a temperatura do ar era menor que cada temperatura-base considerada. A soma de graus-dias negativos (GDN) foi determinada conforme metodologia descrita por Scarpari e Beauclair (2004). De forma semelhante ao cálculo do NHF foram avaliadas as temperaturas-base (T_b) de 10 a 22°C, a partir da seguinte equação:

$$GND = \frac{(T_b - T_{m\acute{a}x})^2}{2 \times (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})} \times n \quad (14)$$

em que: T_b é a temperatura-base considerada; $T_{m\acute{a}x}$ é a temperatura máxima média do período considerado; $T_{m\acute{i}n}$ é a temperatura mínima média do período considerado; n é o período de tempo (em dias) considerado.

A temperatura noturna também foi determinada a partir de dados médios coletados a cada 15 minutos, e envolveu a avaliação dos seguintes intervalos: 18 às 6h,

19 às 6h, 20 às 6h e 21 às 6h. Essa análise teve por objetivo encontrar o intervalo noturno em que a temperatura do ar apresentasse maior influência sobre a maturação.

Os dados de armazenamento, déficit e excedente hídrico foram obtidos a partir do balanço hídrico sequencial, calculado pelo método de Thornthwaite e Mather (1955). Nesse caso, foi utilizada uma planilha desenvolvida por Rolim et al. (1998). Foram empregados os valores diários de temperatura máxima e mínima do ar, fotoperíodo e precipitação dos anos de 2002 e 2003 para elaboração dos balanços hídricos.

Para a estimativa da evapotranspiração potencial (ETP) pelo método de Thornthwaite (1948), os índices de calor a e I foram determinados a partir dos valores médios normais de temperatura média do ar de Piracicaba, SP. Para melhor adequação dos resultados do balanço hídricos, a ETP foi estimada a partir dos ajustes propostos por Camargo et al. (1999), em que a temperatura média do ar é substituída pela temperatura efetiva, calculada pela seguinte equação:

$$T_{ef} = 0,36 \times [(3 \times T_{max}) - T_{min}] \quad (15)$$

em que: T_{ef} é a temperatura efetiva; T_{max} é a temperatura máxima e T_{min} é a temperatura mínima, todas em °C. A utilização da temperatura efetiva ao invés da temperatura média do ar na estimativa da ETP busca superar possíveis subestimativas dessa variável nos períodos do ano com menor umidade relativa do ar.

O balanço hídrico foi calculado na escala diária a partir do dia 1° de janeiro de 2002 até o dia 31 de dezembro de 2003, embora os dados realmente empregados no estudo sejam apenas a partir do mês de outubro de 2002. O cálculo do balanço hídrico, em período anterior ao que realmente foi realizado empregado o estudo, tem por objetivo promover estabilização dos dados de armazenamento e do negativo acumulado para melhorar a qualidade das estimativas de déficit e excedente hídrico no período desejado. Além disso, foram avaliados três valores de capacidade de água disponível (CAD): 50, 75 e 100 mm, o que representa o intervalo mais citado de valores de CAD para os solos da área cultivados com cana-de-açúcar.

3.6 Análise exploratória multivariada

3.6.1 Análise de agrupamento de cultivares

Para estudar a estrutura multivariada contida nos dados analisados foram aplicados três métodos estatísticos multivariados, visando classificar as cultivares em grupos: análise de agrupamentos hierárquica; análise de agrupamentos não-hierárquica *k-means*; e análise de componentes principais. Com isso pôde-se agrupar as cultivares de cana-de-açúcar segundo seu padrão de maturação (precoce, médio e tardio) e, em etapa posterior, criar modelos para essas condições.

A análise foi processada aos valores padronizados de produtividade (TCH), ATR, Pol%cana, Brix, açúcares redutores (ARC), fibra, pureza, umidade, resultando em média nula e variância unitária (HARTINGAN, 1975). A não-padronização poderia levar a inconsistências nas soluções das duas técnicas, já que a maioria das medidas de distância é bastante sensível a diferentes escalas ou magnitudes das variáveis. As técnicas de agrupamento são classificadas no contexto das análises multivariadas como técnicas de interdependência, nas quais nenhuma variável é definida como independente ou dependente, pois o processo envolve a análise simultânea de todas as variáveis em conjunto. A análise de agrupamento (SNEATH; SOKAL, 1973) foi realizada calculando-se a distância euclidiana entre as cultivares, para o conjunto das 8 variáveis, e utilizando o algoritmo de Ward para a obtenção dos agrupamentos de meses similares. O resultado da análise foi apresentado em forma gráfica (dendrograma) que auxiliou na identificação dos agrupamentos dos meses. A identificação dos meses nos grupos também foi feita pelo *k-means* (HAIR, 2005) que pertence à classe dos métodos de agrupamentos não-hierárquicos e não supervisionados. Este método minimiza a variância dos acessos dentro de cada grupo.

Além disso, empregou-se o uso da análise de componentes principais, a qual condensa a informação relevante, contida em p variáveis ($p = 8$, nesse estudo), em um conjunto menor de variáveis latentes ortogonais que são denominados componentes principais (autovetores), gerados por combinações lineares das variáveis originais a partir dos autovalores da matriz de covariância. Cada par de componentes principais

gera uma representação bidimensional do espaço amostral original denominado “biplot” na qual é possível explicar a estrutura de variáveis direcionando feixes de variáveis nas regiões de máxima variabilidade. Foram considerados os primeiros componentes principais (CP's) cujos autovalores foram superiores a unidade (KAISER, 1958). Os coeficientes das funções lineares, que definem os CP's, foram utilizados na interpretação de seu significado, usando o sinal e o tamanho relativo dos coeficientes como uma indicação do peso a ser atribuído para cada variável. Somente coeficientes com altos valores foram considerados para a interpretação, usualmente aqueles maiores ou iguais a 0,50. Todas as análises estatísticas foram processadas no software STATISTICA versão 9.0 (STATSOFT, 2010).

3.6.2 Análise de componentes principais entre variáveis meteorológicas e indicadoras de qualidade e produtividade da matéria-prima

A análise de componentes principais foi empregada para encontrar quais variáveis meteorológicas e relacionadas à qualidade e produtividade de matéria-prima de cada cultivar estão mais relacionadas aos processos de crescimento vegetativo e maturação da cana-de-açúcar ao longo dos meses de safra. Nesse caso, a análise foi processada aos valores padronizados de variáveis relacionadas à produtividade, à qualidade da matéria-prima e às condições meteorológicas (Tabela 1), resultando em média nula e variância unitária (HARTINGAN, 1975). A análise de componentes principais foi aplicada ao conjunto de variáveis (p) acima descrito (nesse caso, p foi igual a 23) obtido para cada cultivar. De forma semelhante ao descrito na análise exploratória das variáveis tecnológicas, foram considerados os primeiros componentes principais cujos autovalores foram superiores à unidade (KAISER, 1958) para geração dos gráficos “biplots”. Os coeficientes das funções lineares, que definem os CP's, foram utilizados na interpretação de seu significado, usando o sinal e o tamanho relativo dos coeficientes como uma indicação do peso a ser atribuído para cada variável. Somente coeficientes com altos valores foram considerados para a interpretação (maiores ou iguais a 0,50). Todas as análises estatísticas foram processadas no software STATISTICA versão 9.0 (STATSOFT, 2010).

Tabela 1 - Variáveis relacionadas à produtividade e à qualidade da matéria-prima das cultivares e variáveis meteorológicas utilizadas para análise de componentes principais

Variáveis matéria-prima	Temperatura	Precipitação e Balanço Hídrico	Umidade Relativa	Radiação Solar
AR	Média	Precipitação total	Média	Global
Pol%cana	Amplitude Térmica	Excedente hídrico	DPV	Líquida
Brix	Noturna	Déficit hídrico		Fotoperíodo
Pureza	Horas de frio			Insolação
ATR	Graus dia Negativos			
Umidade				
Fibra				
TCH				
TPH				

3.7 Modelagem matemática da maturação da cana-de-açúcar

3.7.1 Análise estatística preliminar

A partir dos dados diários das variáveis meteorológicas (Tabela 1) foram calculados valores médios e totais de períodos que antecederam às amostragens. Os períodos avaliados foram de 30, 60, 90, 120 e 150 dias anteriores à data de cada amostragem, conforme demonstra a Figura 1. Com isso, buscou-se considerar o efeito cumulativo das condições meteorológicas sobre a maturação das cultivares estudadas.

Figura 1 - Representação esquemática da maneira pela qual o efeito das variáveis meteorológicas foi considerado no estudo

Foram construídas matrizes de correlação de Pearson entre os valores médios ou totais das variáveis meteorológicas de cada período (30, 60, 90, 120 e 150 dias) e as variáveis obtidas com a análise tecnológica das amostras coletadas no campo, sendo as mesmas: AR, Brix, Pol%cana ATR, pureza, fibra e umidade. No caso de variáveis meteorológicas, como número de horas de frio, soma de graus-dias negativos, temperatura noturna, déficit e excedente hídrico, foram feitas análises prévias (matrizes de correlação) para determinação dos valores de referência que melhor se adequavam às variações das análises tecnológicas. Assim, no caso do número de horas de frio e da soma de graus-dias negativos foram avaliadas as temperaturas-base de 10 a 22°C. No caso da temperatura noturna foram avaliados os quatro intervalos já citados (18 às 6h, 19 às 6h, 20 às 6h e 21 às 6h). Finalmente, as variáveis relacionadas ao balanço hídrico foram selecionadas quanto à CAD a ser utilizada, sendo avaliados os valores de 50, 75 e 100 mm.

3.7.2 Concepção dos modelos

A partir dos resultados obtidos nas análises multivariadas e de correlação linear de Pearson entre as variáveis meteorológicas e oriundas da análise tecnológica da cana-de-açúcar, foram selecionadas as variáveis consideradas mais importantes ao processo de maturação. Além da importância em relação ao processo de maturação, utilizou-se também outro critério, relacionado à facilidade na obtenção dos dados meteorológicos necessários e ao número de estações disponíveis para tanto. Para evitar efeitos de multicolineariedade entre as variáveis durante a modelagem, realizou-se matriz de correlação de Pearson entre as mesmas, de forma a realizar uma segunda etapa de seleção. As variáveis selecionadas a partir dessas premissas foram correlacionadas às variáveis Pol%cana, ATR, Brix, fibra e umidade, de forma a gerar três classes de modelos segundo a época de maturação das cultivares: precoces, médias e tardias. Foram avaliados ajustes lineares, exponenciais e logarítmicos e multivariados. As variáveis meteorológicas selecionadas foram submetidas à análise de regressão linear múltipla pelo processo “STEPWISE”, para obtenção dos modelos que expressassem os efeitos dessas na maturação. O fator de inflação da variância (VIF)

das variáveis exploratórias foi utilizado para examinar a multicolinearidade e escolher o conjunto de variáveis, para uso na análise de regressão multivariada ($VIF < 0,10$). O processo “STEPWISE” foi aplicado a cada modelo proposto, em diferentes arranjos de variáveis, e o nível de significância do teste F utilizado para julgar a inclusão ou exclusão de uma variável aos modelos foi $p = 0,05$. Os modelos foram avaliados pelos valores de R^2 ajustado e pela análise da distribuição e normalidade dos resíduos, conforme recomendado por Motulsky e Christopoulos (2003). As análises foram realizadas no software Minitab 16 (MINITAB Inc., 2010).

3.8 Avaliação dos modelos com dados independentes

A avaliação do desempenho dos modelos gerados foi realizada a partir de dados independentes coletados em experimentos idênticos ao descrito no presente trabalho, porém realizados em outras unidades do grupo Raízen (Jaú e Capivari). As amostras foram realizadas a partir de março de 2003 e se estenderam até outubro do mesmo ano. Os valores mensais obtidos nas análises tecnológicas foram correlacionados com aqueles obtidos pelos modelos propostos (respeitando-se o padrão de maturação das cultivares em precoces, médias e tardias) para avaliar a confiabilidade dos dados estimados em termos de precisão e exatidão dos resultados. Os dados de precipitação foram obtidos em estações do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), localizadas nas cidades de Jaú e Capivari.

Os dados estimados e medidos para cada variável foram comparados por análise de regressão (coeficiente de determinação ajustado, com $p > 0,05$), índice de concordância de Willmott (D) e de confiabilidade de Camargo (C) e pela avaliação dos erros: médio (EM) e absoluto médio (EAM), como sugerido por Willmott et al. (1995) e Camargo e Sentelhas (1997):

$$D = 1 - \left\{ \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (|P_i - O_m| + |O_i - O_m|)^2} \right\} \quad (16)$$

$$EAM = \frac{\sum(P_i - O_i)}{N} \quad (17)$$

$$EM = \frac{\sum(P_i - O_i)}{N} \quad (18)$$

em que: P_i é o valor estimado, O_i é o valor medido, O_m o valor medido médio e N número de eventos ou pares de dados . O coeficiente C foi determinado por (CAMARGO; SENTELHAS, 1997):

$$C = D \times \sqrt{R^2} \quad (19)$$

em que R^2 é o coeficiente de determinação.

A classificação do desempenho de cada modelo seguiu o critério adotado por Camargo e Sentelhas (1997), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos valores de desempenho do índice confiabilidade de Camargo para os modelos gerados

Intervalo de “C”	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: CAMARGO e SENTELHAS (1997).

3.9 Aplicações do modelo em escala operacional: extrapolações para diferentes safras e regiões

Os modelos gerados foram avaliados em relação a seu potencial de previsibilidade com dados independentes coletados em áreas comerciais durante seis safras (2005/06 a 2010/11). Para tanto, adotou-se, pela disponibilidade de dados, o

modelo estimativa da ATR mensal. Os dados de ATR mensal foram obtidos em unidades localizadas nas regiões de Piracicaba, Jaú, Ourinhos, Araçatuba, Jaboticabal e Igarapava. Para a estimativa dos valores de ATR foram utilizados dados meteorológicos obtidos em estações próximas às regiões analisadas, de forma a melhor representar as características de cada local. O ATR estimado final de cada mês foi obtido pela ponderação dos resultados de cada modelo (precoce, médio e tardio), de acordo com a proporção das cultivares estudadas nas unidades consideradas. O objetivo foi avaliar a adequação do modelo em condições climáticas diferentes daquelas observadas no local e ano de seu desenvolvimento. Nesse caso, os dados estimados e medidos de ATR de todas as safras foram reunidos (por região) e comparados de por análise de regressão (coeficiente de determinação ajustado, com $p > 0,05$), índice de concordância de Willmott (D) e de confiabilidade de Camargo (C) e pela avaliação dos erros: médio (EM) e absoluto médio (EAM).

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização climática do local do experimento

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam, respectivamente, o regime térmico, a distribuição das chuvas e o balanço hídrico climatológico normal da região de Piracicaba, SP, considerando-se o período de 1981 a 2010. Como pode ser observado, a região é marcada por variação sazonal da temperatura, a qual é função de sua posição geográfica. Os maiores valores de temperatura são registrados nos meses de fevereiro e março, quando a temperatura máxima chega a 30,3°C e 30,0°C, respectivamente. Enquanto isso, o mês de julho apresenta as menores temperaturas, com valores de temperatura mínima média de 9,6°C. Dessa forma, a região apresenta considerável amplitude térmica anual, condição de grande importância para a maturação da cana-de-açúcar (ALEXANDER, 1973).

Figura 2 - Variação mensal das temperaturas máximas, mínimas e médias em Piracicaba, São Paulo, durante o período de 1981-2010

A precipitação total média anual é apresentada na Figura 3. Como pode ser observado, o regime de chuvas da região é bem característico do interior do estado de São Paulo, apresentando variação sazonal, com verão chuvoso e inverno seco. Devido

à combinação de diversos fatores macro-climáticos que atuam na região, o total pluviométrico anual é da ordem de 1.325 mm, sendo que cerca de 76% ocorrem entre os meses de outubro e março. O mês com maior precipitação é janeiro (229 mm), seguido por dezembro (199,5 mm) e fevereiro (182,4 mm). Os meses de menor precipitação coincidem com os meses de menores temperaturas, ou seja, são os meses de junho (42,3 mm), julho (29,1 mm) e agosto (29,9 mm).

Figura 3 - Precipitação mensal média de Piracicaba, São Paulo, durante o período de 1981-2010

A variação sazonal das chuvas sofre pouca variação interanual, porém podem ocorrer eventos chuvosos durante a estação seca, de abril a setembro, resultando em variação na disponibilidade hídrica dos solos durante esse período. Contudo, o total anual de precipitação apresenta considerável variação, oscilando de 875 a 2.015 mm.ano⁻¹, fato que pode prejudicar o desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar e sua produtividade final. Apesar disso, a ocorrência de períodos secos, entre abril e setembro, garante condição para o processo de maturação, favorecendo a qualidade do caldo e a produtividade de açúcar por hectare (CASTRO, 2000). Segundo Gheller (2001), na região sudeste do Brasil, o processo de maturação da cana-de-açúcar ocorre naturalmente a partir de abril/maio, atingindo seu pico máximo no mês de setembro. As condições climáticas que predominam nesse período, com a gradativa queda da

temperatura e a diminuição das precipitações no meio do ano, são determinantes para que o processo de maturação ocorra de forma adequada.

O balanço hídrico climatológico normal da região de Piracicaba, SP, para uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm e com a evapotranspiração potencial sendo estimada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), é apresentado na Figura 4. Como pode ser observado, há ocorrência de excedentes hídricos de dezembro a março, totalizando 248 mm, sendo que desse total 117 mm ocorrem no mês de janeiro. Essa variação já era esperada já que é nesse mês que ocorrem as maiores precipitações.

Figura 4 - Balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, para o período de 1981 a 2010, para uma capacidade de água disponível de 100 mm e com evapotranspiração potencial estimada pelo método de Penman-Monteith

Os meses de abril a setembro caracterizam-se por apresentar déficit hídrico, com valores crescentes a partir do mês de abril, alcançando valor máximo no mês de agosto (43 mm). Em média, a deficiência hídrica total anual é da ordem de 138 mm e embora o déficit hídrico seja predominante nos meses de outono-inverno é comum, nessa região, a ocorrência de algumas chuvas durante a estação seca. A partir de setembro-outubro, o déficit hídrico tende a diminuir tornando-se praticamente inexistente em novembro. Como será discutido a seguir, essas informações serão importantes pois tanto o ápice

do déficit hídrico, como as temperaturas mínimas ocorrem em torno de agosto, ou seja, próximos ao momento de maior acúmulo de sacarose pela cana-de-açúcar.

Condições similares aos valores normais de temperatura, chuva e balanço hídrico, foram observados no período do experimento. As Figuras 5, 6 e 7 apresentam, a variação da temperatura (máxima, mínima e média), da precipitação e o balanço hídrico referentes ao período de realização do experimento (2002-2003). Os dados médios mensais de temperaturas média, máxima e mínima observados durante o período considerado são apresentados na Figura 5. Como pode ser observado, a temperatura máxima alcançou maior valor no mês de outubro de 2002 (35°C), com predomínio de temperaturas máximas acima de 30°C até o segundo decêndio de março de 2003. Nesse período, a temperatura média permaneceu em torno de 25°C e a mínima em torno de 20°C , condições tidas como ideais para o desenvolvimento vegetativo da cultura (DOOREMBOS; KASSAN, 1994).

Figura 5 - Variação decendial dos valores de temperaturas máxima, média e mínima durante o período do experimento (2002-2003)

O maior valor mensal de precipitação foi registrado em janeiro de 2003 (297,6 mm), aproximadamente 30% acima da média da região (Figura 6). O volume de chuva diminuiu drasticamente no mês seguinte, quando a precipitação registrada foi 71%

menor do que a média (52,5 mm). Em março o volume de chuvas voltou a subir (177,5 mm), sendo 24% acima da média. Nos meses seguintes (abril a setembro), o total de chuva mensal diminuiu, chegando ao valor de 12 mm em setembro (80,6% abaixo da média). Nesse cenário, o mês de maio foi exceção, pois foi o único mês desse período que apresentou valores próximos à condição média. A partir de outubro o volume de chuvas aumentou, com valores de precipitação de 360 mm registrados no período de outubro a dezembro. As chuvas de maio e início de junho de 2003 totalizaram 63,1 mm, e tiveram grande importância na variação da qualidade tecnológica das amostras de cana-de-açúcar retiradas ao longo do ano.

Figura 6 - Precipitação decenal durante o período experimental, de setembro de 2002 a dezembro de 2003, em Piracicaba, SP

O balanço hídrico sequencial do período de janeiro de 2002 a dezembro de 2003 é apresentado na Figura 7. Nesse caso, fica evidente o padrão de períodos mais úmidos (novembro a março) e secos (abril a outubro). Contudo, também se podem notar inversões nesse padrão em alguns meses, com ocorrência de veranicos em períodos úmidos, como em fevereiro e março de ambos os anos, indicados pelas setas vermelhas, e de chuvas em períodos secos, como em maio de ambos os anos, indicados pelas setas azuis. As primeiras amostragens de cana-de-açúcar para análise tecnológica, em março e abril de 2003, foram realizadas em condições de baixo déficit

hídrico, o qual se intensificou a partir do final de abril. Contudo, as chuvas ocorridas em maio-junho promoveram uma atenuação temporária da intensificação do déficit hídrico. A partir de julho, as condições de déficit hídrico se estabeleceram novamente e alcançaram valores máximos entre agosto e setembro. No período de outubro a novembro, embora ainda tenha havido déficit hídrico, o volume de chuvas foi considerável, fato que modificou as condições meteorológicas que afetaram as últimas amostragens de cana, com reflexos na qualidade do caldo e nos resultados da análise tecnológica.

Figura 7 - Balanço hídrico climatológico sequencial durante o período do experimento (2002-2003), em Piracicaba, SP, para uma CAD de 100 mm. As setas vermelhas indicam períodos de déficit hídrico e as azuis com chuva no início da estação seca

4.2 Avaliação das cultivares

4.2.1 Efeito de épocas de plantio na produtividade e na maturação da cana-de-açúcar

O efeito das épocas de plantio no desenvolvimento e maturação da cana-de-açúcar é apresentado nas Figuras 8 a 11. Como pode ser observado nas Figuras 8 e 9, a variação da produtividade de cana-de-açúcar por hectare (TCH) em função da época

de plantio é muito grande e influenciada não somente pelo momento do plantio, mas também pela da época de colheita e pela cultivar analisada. Os valores de coeficiente de variação ao longo dos meses do ano são altos (de 8 a 42%) e não seguem uma tendência de aumento ou diminuição em função da época do ano.

Figura 8 - Produtividade de colmos por hectare (TCH) ao longo da safra de 2003, em função do mês de plantio para diferentes cultivares de cana-de-açúcar (SP91-1049, SP86-155, SP90-3414 e SP87-365), cultivadas em Piracicaba, SP

Figura 9 - Produtividade de colmos por hectare (TCH) ao longo da safra de 2003, em função do mês de plantio para diferentes cultivares de cana-de-açúcar (RB867515, RB928064, SP83-2847 e SP86-42), cultivadas em Piracicaba, SP

Esses resultados podem estar ligados ao fato da produção de biomassa ser influenciada não somente pelas condições meteorológicas e varietais, mas também pelo manejo da cultura e pela forma de amostragem realizada. Nesse sentido, Evensen et al. (1997) afirmaram que um dos principais problemas das amostragens para determinação de acúmulo de biomassa em cana-de-açúcar é que raramente são feitas em termos de matéria seca com todos os seus componentes, incluindo ponteiros, colmos, palha, folhas e raízes. Embora haja limitações nos dados obtidos, há uma clara tendência de que os plantios de maio, junho e julho apresentem as maiores produtividades. Isso era esperado, visto que a produtividade agrícola (TCH) é fortemente influenciada, não apenas pelas condições meteorológicas e nutricionais, mas principalmente pela idade da cultura (CLEMENTES et al., 1952; CLEMENTS, 1959).

A variabilidade observada na produtividade agrícola (TCH) em função da época de plantio é muito menos intensa quando se analisa, por exemplo, as variáveis relacionadas ao processo de maturação da cana-de-açúcar. Como pode ser observado nas Figuras 10 e 11, os teores de Pol%cana (variável indicadora de teor de sacarose, portanto, de maturação) apresentam, em todas as cultivares analisadas, um acréscimo ao longo do período de safra, chegando a valores máximos em torno de setembro-outubro. Isso está de acordo com Deuber (1988), que cita que o processo de maturação da cana-de-açúcar ocorre naturalmente no início de maio na Região Sudeste do Brasil, atingindo seu ponto máximo em outubro, em função das condições meteorológicas que predominam no período.

Figura 10 - Teores de Pol%cana ao longo da safra de 2003 em função do mês de plantio para diferentes cultivares de cana-de-açúcar (SP91-1049, SP86-155, SP90-3414 e SP87-365), cultivadas em Piracicaba, SP

A variabilidade dos teores de Pol%cana nas mesmas datas de amostragem em função das épocas de plantio é muito pequena (CV variando entre 2,5 e 4,5%), quando comparada aos valores de TCH, e tendem a se tornar menores com o passar da safra, atingindo valores de CV menores que 1% em outubro. Conforme discutido acima, essa situação é devida ao fato da produtividade em TCH ser fortemente influenciada, não apenas pelas condições meteorológicas e nutricionais, mas principalmente pela idade da cultura (CLEMENTES et al., 1952; CLEMENTS, 1959). Enquanto isso, a maturação é um processo menos dependente da idade da planta, pois a cana-de-açúcar pode ser facilmente amadurecida em alguns meses após a sua brotação (desde que superado o período juvenil) pela retirada de água, nutrientes ou qualquer outro fator que condicione o crescimento (ALEXANDER, 1973).

Figura 11 - Teores de Pol%cana ao longo da safra de 2003 em função do mês de plantio para diferentes cultivares de cana-de-açúcar (RB867515, RB928064, SP83-2847 e SP86-42), cultivadas em Piracicaba, SP

4.2.2 Composição da cana-de-açúcar ao longo do ano

A Figura 12 apresenta a variação do teor de açúcares redutores da cana (AR), mostrando como esse diminui ao longo da safra. Isso ocorre devido ao fato de que à medida que ocorre a maturação há o acúmulo de sacarose e diminuição dos teores de açúcares redutores nos internódios (AZEVEDO, 1981). Segundo Lavanholi (2008), os teores de açúcares redutores são mais elevados quanto menor o grau de maturação da cana, sendo os meses de março e abril os que apresentam maiores valores de AR na região Sudeste. Assim, os teores mais elevados de açúcares redutores observados nesses meses indicam que a cultura ainda estava em crescimento vegetativo nesse período (ROBERTSON et al., 1996; MOORE, 1995).

Figura 12 - Teores de açúcares redutores (AR, %), ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

Como pode ser observado na Tabela 3, no início da safra há diferenças marcantes entre as cultivares, com valor médio de AR de $1,15 \pm 0,16$. Cultivares como SP91-1049 e SP86-155, reconhecidamente precoces, apresentam teores abaixo de 1,0% (0,93% e 0,96% respectivamente) já em março, enquanto cultivares mais tardias como SP83-2847 alcançam valores semelhantes apenas em maio. Todavia, em

setembro-outubro as diferenças entre as cultivares foram praticamente inexistentes, com valores médios de AR em torno de $0,56 \pm 0,03$. Os açúcares redutores são produtos precursores de cor no processo industrial, isto é, participam de reações que aumentam a cor do açúcar, depreciando a qualidade do produto (FERNANDES, 2003).

Tabela 3 - Teores de açúcares redutores (AR, %) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

	AR							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	0,93	0,77	0,67	0,61	0,61	0,59	0,60	0,61
SP90-3414	1,10	0,87	0,75	0,64	0,61	0,58	0,57	0,51
SP87-365	1,21	0,95	0,83	0,72	0,72	0,69	0,64	0,56
SP86-42	1,37	0,98	0,86	0,74	0,71	0,65	0,63	0,55
SP86-155	0,96	0,80	0,67	0,58	0,59	0,56	0,58	0,59
SP83-2847	1,32	1,02	0,86	0,76	0,73	0,66	0,63	0,53
RB928064	1,17	0,93	0,75	0,69	0,69	0,63	0,62	0,55
RB867515	1,18	1,02	0,82	0,76	0,68	0,63	0,64	0,54
MÉDIA	1,15	0,92	0,78	0,69	0,67	0,62	0,62	0,56
DP	0,16	0,09	0,08	0,07	0,06	0,04	0,03	0,03
CV	13,54%	10,14%	9,94%	10,04%	8,44%	7,19%	4,38%	5,77%

No caso dos açúcares redutores totais (ART), pode-se notar que há uma relação inversa ao observado nos açúcares redutores da cana (Figura 13 e Tabela 4), ou seja, de aumento com o decorrer dos meses de safra. Esse efeito é devido ao fato de ART referir-se não apenas aos açúcares que se encontram na forma reduzida (glicose e frutose), mas também à sacarose na forma de açúcares redutores. Dessa forma, são considerados todos os açúcares do material amostrado em uma forma única, no caso, açúcares invertidos (FERNANDES, 2003). No interior da planta, o desdobramento da sacarose em glicose e frutose é uma reação de duplo sentido, isto é, ocorre a inversão assim como a combinação durante o metabolismo da fotossíntese e respiração da planta. Desse modo, ao se analisar o caldo de cana, obtém-se os produtos participantes desse processo bioquímico (LAVANHOLI, 2008), os quais são importantes indicadores da relação entre desenvolvimento vegetativo e maturação da cultura.

Figura 13 - Teores de açúcares redutores totais (ART, %) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

Tabela 4 - Teores de açúcares redutores totais (ART, %) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

	ART							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	11,3	12,7	14,6	16,2	16,8	17,7	18,2	18,5
SP90-3414	8,7	10,3	12,7	14,4	15,7	16,9	17,8	18,2
SP87-365	8,2	10,1	12,2	14,0	14,7	16,3	17,2	17,5
SP86-42	7,7	9,9	11,4	13,5	14,4	15,9	17,2	17,7
SP86-155	10,0	11,4	13,1	14,9	15,9	17,1	17,5	18,1
SP83-2847	7,6	9,9	11,6	12,9	14,0	15,4	16,7	17,5
RB928064	8,7	10,6	12,7	13,9	14,8	16,4	17,2	17,8
RB867515	8,7	9,8	12,3	13,5	15,1	16,4	16,9	18,1
MÉDIA	8,86	10,59	12,57	14,16	15,16	16,50	17,35	17,93
DP	1,23	1,00	0,99	1,02	0,91	0,70	0,49	0,36
CV	13,86%	9,49%	7,91%	7,23%	6,03%	4,23%	2,85%	2,02%

De forma semelhante ao ocorrido com o AR, as cultivares mais precoces apresentaram níveis diferenciados de ART no início da safra, os quais se tornaram praticamente iguais às demais cultivares nos meses de setembro e outubro. Cultivares

como SP91-1049 e SP86-155, reconhecidamente precoces, apresentaram teores iguais a 11 e 10% respectivamente, já em março, enquanto cultivares mais tardias como a SP83-2847 e a SP86-42 apresentam valores menores do que 8% (7,6 e 7,7%, respectivamente). Essas diferenças entre as cultivares diminuíram a cada mês da safra, fato observado pela redução do desvio padrão e do coeficiente de variação do ART entre elas, sendo que em outubro tais diferenças foram praticamente inexistentes, com valores médios de ART em torno de $18,0 \pm 0,36$.

Os valores de ATR (Figura 14 e Tabela 5), principal unidade de medida da qualidade de matéria-prima para pagamento na área agrícola do setor sucroalcooleiro brasileiro, representa a quantidade de açúcares totais (ART) recuperados durante o processamento da cana (matéria-prima) até o xarope. Assim sendo, os valores de ATR, embora tenham unidade de medida diferente (kg de ATR por tonelada de cana) do ART (%), apresentam a mesma variação entre cultivares ao longo dos meses de safra, fato que pode ser observado pela igualdade dos valores de coeficiente de variação (%). Dessa forma, observa-se a mesma tendência de aumento nos valores de ATR ao longo da safra, a qual já fora observada nos valores de ART.

Figura 14 - Teores de açúcares totais recuperáveis (ATR, kg.t^{-1}) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

Tabela 5 - Teores de açúcares totais recuperáveis (ATR, kg.t⁻¹) ao longo dos meses de safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

	ATR							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	99,1	111,8	128,4	142,6	147,6	155,5	160,4	163,0
SP90-3414	76,8	91,1	111,3	126,3	137,8	148,5	156,9	160,2
SP87-365	72,3	89,2	107,5	123,2	128,9	143,1	151,3	153,9
SP86-42	67,8	87,2	100,5	118,7	126,5	140,0	151,2	155,5
SP86-155	88,2	100,4	115,2	131,3	140,1	150,2	154,4	159,5
SP83-2847	66,9	86,7	101,8	115,6	122,5	137,9	146,9	154,4
RB928064	76,2	93,3	111,9	130,4	130,5	143,9	151,4	156,4
RB867515	76,3	86,2	108,3	119,2	132,9	144,6	149,0	159,4
MÉDIA	78,0	93,2	110,6	125,9	133,4	145,5	152,7	157,8
DP	10,80	8,84	8,75	8,78	8,12	5,70	4,35	3,19
CV	13,86%	9,49%	7,91%	6,97%	6,09%	3,92%	2,85%	2,02%

Além disso, a gradual redução nas diferenças entre cultivares precoces, médias e tardias ao longo da safra, também é observada no caso do ATR, com os meses de setembro e outubro apresentando a menor variação entre as cultivares. Contudo, embora as diferenças entre cultivares tenham diminuído ao longo da safra, ainda persistem diferenças no potencial genético de algumas delas, fato exemplificado pelas cultivares SP91-1049 e SP83-2847, que apresentaram em outubro uma diferença de 8,6 kg de ATR.

Por serem diretamente relacionadas às variáveis anteriores (ART e ATR), as variáveis Brix (Figura 15 e Tabela 6) e Pol%cana (Figura 16 e Tabela 7), apresentaram tendências similares, de aumento com o passar da safra. Além disso, nota-se a mesma tendência de diminuição das diferenças entre as cultivares com o tempo, sendo que em setembro-outubro essas praticamente inexistem. Brix é a variável mais utilizada na indústria de açúcar e álcool e expressa a porcentagem de sólidos em uma solução açucarada. Assim sendo, existe estreita relação entre essa porcentagem e o conteúdo de sacarose na solução (LAVANHOLI, 2008). A indústria sucroalcooleira, no Estado de São Paulo, considera que uma cana para ser industrializada deve ter, entre outras características, um caldo que contenha no mínimo 18°Brix, ou seja, 18% de sólidos solúveis (FERNANDES, 2003). Esse valor foi alcançado somente em maio pela cultivar

SP91-1049, enquanto as demais cultivares só apresentaram esse valor entre junho e julho.

Figura 15 - Valores de Brix ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

Tabela 6 - Valores de Brix ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

BRIX								
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	14,43	16,10	18,05	19,99	20,90	22,14	22,82	23,01
SP90-3414	11,53	13,33	16,12	18,12	19,76	21,38	22,60	22,91
SP87-365	10,97	13,23	15,73	17,79	18,60	21,16	21,86	21,99
SP86-42	10,97	13,00	14,71	17,11	18,29	20,15	21,99	22,23
SP86-155	13,13	14,76	16,48	18,71	20,28	21,91	22,50	23,00
SP83-2847	10,73	13,28	15,24	16,80	18,22	20,14	21,62	22,42
RB928064	11,80	13,87	16,09	17,54	18,80	20,79	21,89	22,34
RB867515	11,77	13,00	15,93	17,41	19,28	20,96	21,60	22,68
MÉDIA	11,92	13,82	16,05	17,94	19,27	21,08	22,11	22,57
DP	1,26	1,09	0,98	1,02	0,98	0,73	0,46	0,38
CV	10,61%	7,88%	6,13%	5,69%	5,06%	3,46%	2,10%	1,69%

O aumento dos teores de Brix ao longo da safra é uma importante referência para a determinação do grau de maturação da cana-de-açúcar, aspecto fundamental para o sistema de produção da indústria sucroalcooleira, uma vez que o fornecimento contínuo de matéria-prima de elevada qualidade interfere em seu rendimento industrial (DEUBER, 1988). Como será discutido a seguir, durante o período que compreende a safra agrícola da cana-de-açúcar, a gradual queda na temperatura e redução na precipitação determinam a intensidade do processo de maturação, ou seja, os aumentos nos teores de Brix e Pol (LAVANHOLI, 2008).

Do total de sólidos solúveis expresso pelo Brix, a fração relativa à sacarose é expressa pela Pol, a qual pode ser relacionada à fibra, resultando na variável Pol%Cana (FERNANDES, 2003). A concentração de sacarose em cultivares de cana-de-açúcar varia naturalmente durante a safra, tendendo a ser menor durante períodos quentes e úmidos, mais favoráveis ao desenvolvimento vegetativo, e maior quando as condições meteorológicas, tais como baixas temperaturas ou déficit hídrico, inibem o crescimento (LINGLE; IRVINE, 1994).

Figura 16 - Teores de sacarose (Pol%cana) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

Como já mencionado anteriormente, a “cana-padrão”, em condições tecnológicas e econômicas de processamento industrial, deve apresentar o teor de sacarose

(Pol%cana) de 12,257% (CONSECANA, 2006). As cultivares SP91-1049 e SP86-155 apresentaram tal característica em torno maio-junho, sendo consideradas então como precoces segundo Lavanholi (2008). Deve-se ressaltar que a cultivar SP91-1049 apresentou tal característica já no mês de maio (Pol%cana = 13,23%), quando a cultivar SP86-155 ainda apresentava Pol%cana igual a 11,79%. Já as demais cultivares apresentaram valores similares, acima de 12,257%, apenas em junho-julho. Nesse sentido, a cultivar SP83-2847 apresentou níveis mínimos de Pol%cana adequados para a industrialização somente em julho, indicando ser a mais tardia das cultivares avaliadas.

Tabela 7 - Teores de sacarose (Pol%cana) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

	Pol%cana							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	9,82	11,34	13,23	14,81	15,35	16,22	16,75	17,09
SP90-3414	7,25	9,15	11,27	13,14	14,40	15,67	16,59	17,12
SP87-365	6,65	9,21	10,87	12,57	13,34	15,16	16,13	16,61
SP86-42	6,02	8,54	10,30	12,27	13,18	14,72	15,78	16,54
SP86-155	8,61	10,18	12,54	13,87	15,12	15,74	16,17	16,79
SP83-2847	5,97	8,24	10,37	11,67	12,69	14,33	15,79	16,20
RB928064	7,12	9,52	11,83	12,44	13,44	15,20	15,75	16,69
RB867515	7,12	8,56	11,59	12,60	13,69	15,30	15,48	16,89
MÉDIA	7,32	9,34	11,50	12,92	13,90	15,29	16,06	16,74
DP	1,31	1,02	1,03	1,00	0,96	0,60	0,44	0,30
CV	17,86%	10,90%	8,92%	7,72%	6,89%	3,90%	2,74%	1,81%

A qualidade tecnológica da matéria-prima, seja ela expressa pela Pol%cana ou pelas demais variáveis, tais como Brix ou ATR, variou de forma inversamente proporcional aos valores de precipitação registrados no período do experimento (Figura 6). Dados relatados por Castro (2000) mostram que a porcentagem de sacarose nos quatro meses anteriores à colheita aumentou de 4,5% para 13,7% ($\approx 200\%$), processo associado à intensa redução da precipitação e da temperatura do ar.

A variável pureza pode ser entendida, grosso modo, como a porcentagem de Pol no Brix, ou seja, a quantidade de sacarose no total de sólidos solúveis do caldo (CHEN, 1985). Canaviais em crescimento vegetativo pleno apresentam baixos valores de

pureza, devido ao predomínio de açúcares redutores nos sólidos solúveis, os quais são utilizados no processo de respiração e formação de novos tecidos da planta. Durante o período de maturação, o acúmulo de sacarose vai elevando a pureza devido ao aumento dos açúcares em relação aos sólidos solúveis (STUPIELLO, 2000). No estado de São Paulo, essa variável deve apresentar valor mínimo de 80% (início da safra) ou 85% (durante a safra) para que seja recomendada a industrialização da cana (FERNANDES, 2003). Nesse sentido, a cultivar SP91-1049 foi a que apresentou mais precocemente (abril) o valor mínimo de pureza para industrialização no início de safra. A cultivar SP86-155 só apresentou valor semelhante ao da SP91-1049 em maio (Figura 17 e Tabela 8), enquanto que as demais cultivares apresentaram valores de pureza em torno de 70 a 75% no mesmo período (abril-maio).

Figura 17 - Teores de Pureza (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

A baixa pureza do caldo está relacionada à alta atividade de invertase ácida (SHETIYA et al., 1991; LINGLE; SMITH, 1991) e essa atividade está correlacionada com a taxa de elongação e, portanto, ao crescimento vegetativo (GLAZIOU et al., 1959; VENKATARAMANA et al., 1991). Segundo Stupiello (2001), a industrialização de canas imaturas, com baixa pureza, prejudica a recuperação da sacarose no processo de cristalização e, portanto, a obtenção de um açúcar de melhor qualidade. Esse fato

explica o porquê de muitas unidades industriais iniciarem a safra com menores rendimentos em sua produção de açúcar e direcionarem sua atenção nessa época à produção de álcool, já que para a fermentação é indiferente o uso de sacarose ou açúcares redutores.

Valores de pureza acima de 85% só foram observados a partir de junho-julho para as cultivares SP91-1049 e SP86-155, enquanto as demais cultivares só apresentaram valores semelhantes a partir de outubro, quando a diferença entre as cultivares foi praticamente inexistente (CV menor que 0,7%). Altos valores de pureza na matéria-prima indicam uma maior facilidade no processamento e obtenção de açúcar de qualidade com alto rendimento, devido à baixa quantidade de não-açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos, amido, açúcares redutores, além de outros precursores de cor (STUPIELLO, 2000).

Tabela 8 - Teores de pureza (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

	PUREZA							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	75,95	80,47	83,81	85,59	85,39	85,88	85,95	87,85
SP90-3414	70,35	77,05	80,97	84,18	85,15	86,13	86,22	88,30
SP87-365	66,90	74,82	78,64	81,94	81,94	82,48	84,30	86,79
SP86-42	61,41	73,89	77,56	81,46	82,09	84,16	84,37	87,01
SP86-155	74,38	79,02	83,23	86,02	85,71	86,42	85,92	88,39
SP83-2847	62,81	72,26	77,22	80,14	81,07	83,16	84,13	87,33
RB928064	67,75	77,93	81,19	82,79	82,79	84,54	84,75	87,07
RB867515	67,70	72,58	78,71	80,46	82,95	84,41	84,19	87,43
MÉDIA	68,41	76,00	80,17	82,82	83,39	84,65	84,98	87,52
DP	5,07	3,06	2,52	2,24	1,78	1,42	0,89	0,60
CV	7,41%	4,02%	3,14%	2,71%	2,14%	1,68%	1,05%	0,69%

Outra variável de grande importância para a qualidade da cana-de-açúcar, enquanto matéria-prima é o teor de fibra. Do ponto de vista tecnológico, a fibra compreende todas as substâncias insolúveis em água contidas na matéria-prima e sua importância está relacionada à colheita mecanizada da cana-de-açúcar, com implicações no porte ereto e no menor tombamento das plantas, e à industrialização,

com impactos na moagem e no balanço térmico da fábrica. Os níveis de fibra, em uma cana padrão, devem oscilar de 8 a 14% (LAVANHOLI, 2008). Nas amostras realizadas no presente estudo, a variável fibra foi a que mostrou maior variação em função das cultivares e épocas do ano. Como pode ser observado na Figura 18 e na Tabela 9, os teores de fibra de todas as cultivares aumentaram ao longo da safra (de 8,98% para 12,71%, em média), porém não foi observada a diminuição das diferenças entre cultivares, assim como observado nas demais variáveis tecnológicas analisadas. Nesse sentido, os valores de coeficiente de variação permaneceram praticamente inalterados entre início (4,73%) e final de safra (4,54%).

Figura 18 - Teores de fibra (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

Ainda que o teor de fibra tenha aumentado ao longo da safra em todas as cultivares, aquelas com maiores e menores teores de fibra no início de safra mantiveram-se na mesma posição ao final do período analisado, sugerindo ser a fibra uma variável muito mais relacionada às características varietais do que à época do ano ou às condições meteorológicas locais. Segundo Fernandes (2003), o teor de fibra da cana é uma característica varietal, mas também é influenciado por diversos fatores, como clima (chuva e temperatura), umidade e fertilidade do solo, época de corte e método de determinação. Já Stupiello (2002) comentou que a variação do teor de fibra

é função da cultivar, tipo de solo, período de safra, idade do canavial, das condições meteorológicas e práticas culturais.

Tabela 9 - Teores de fibra (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

	FIBRA							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	8,82	10,05	10,15	10,72	11,10	11,57	11,49	12,09
SP90-3414	8,88	10,04	10,69	11,53	11,82	12,44	12,38	13,10
SP87-365	8,27	9,76	10,11	10,74	10,60	11,47	11,54	12,29
SP86-42	8,84	9,60	10,44	10,61	11,34	11,91	11,70	12,34
SP86-155	9,67	10,94	11,31	12,04	12,58	13,28	12,88	13,57
SP83-2847	9,39	10,14	10,79	11,42	11,73	12,68	12,55	13,46
RB928064	9,17	9,87	10,31	10,93	10,91	11,83	11,84	12,43
RB867515	8,83	9,55	9,88	10,50	10,82	11,42	11,92	12,40
MÉDIA	8,98	9,99	10,46	11,06	11,36	12,08	12,04	12,71
DP	0,42	0,44	0,46	0,54	0,65	0,66	0,51	0,58
CV	4,73%	4,38%	4,36%	4,90%	5,74%	5,49%	4,21%	4,54%

Embora não seja usualmente considerada na rotina do setor sucroalcooleiro, especialmente, na área agrícola, a umidade da matéria-prima é uma das mais importantes variáveis relacionadas à qualidade do caldo. A umidade (teor de água em %) nos colmos tem implicações no rendimento da indústria e nos custos com transporte da matéria-prima, visto que canaviais com maior umidade resultam em menores teores de açúcares por tonelada transportada. Apesar da grande importância, existem poucos estudos sobre a dinâmica do conteúdo de água nos colmos da cana-de-açúcar. Fernandes e Benda (1985) mediram o conteúdo de água nos entrenós de colmos de diferentes idades e encontraram que o conteúdo de água diminui do topo para a porção inferior do colmo. A diminuição da umidade é balanceada pelos ganhos em sacarose e fibra. Isso sugere que a água é substituída pela sacarose e fibra durante a maturação, mas a relação quantitativa entre essas variáveis não foi estudada. No presente estudo encontraram-se padrões semelhantes, com a umidade diminuindo ao longo da safra em todas as cultivares (Figura 19 e Tabela 10), ao mesmo tempo em que os teores de sacarose e fibra aumentaram no decorrer dos meses. Entre todas as variáveis

analisadas, a umidade foi a que apresentou a menor variação entre as cultivares tanto no início (CV de 1,60 %) quanto ao final da safra (CV de 0,94 %).

No início da safra os valores de umidade são, em média, de 80%, sendo que os menores valores são encontrados nas cultivares de maior precocidade. Segundo Liu e Helyar (2002), durante o período de rápido crescimento (janeiro a março) a maior porção dos entrenós estão imaturos e com alta umidade. Esses autores encontraram valores de umidade similares aos apresentados nesse trabalho, os quais variaram de 85 a 90% em amostras realizadas entre fevereiro e março. Liu e Helyar (2002) também observaram que os teores de umidade são dependentes não apenas das cultivares, mas principalmente da época do ano e das condições meteorológicas. À medida que há redução na precipitação e na temperatura do ar inicia-se o processo de maturação da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, o teor de água nos colmos diminui. Ao final do inverno, a umidade dos colmos atinge valores mínimos (60 a 70%) e é praticamente igual em todas as porções do colmo.

Figura 19 - Umidade nos colmos (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

Tabela 10 - Umidade nos colmos (%) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

	UMIDADE							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	78,02	75,46	73,63	71,43	70,32	68,85	68,32	69,69
SP90-3414	80,61	77,96	74,91	72,43	70,75	68,84	67,82	66,99
SP87-365	81,67	78,29	75,75	73,38	72,77	69,79	69,13	68,42
SP86-42	80,43	78,65	75,30	73,82	71,57	69,62	69,23	67,78
SP86-155	78,47	75,91	74,08	71,51	69,70	67,72	67,52	68,55
SP83-2847	80,89	77,92	75,61	73,69	72,19	69,73	68,55	67,14
RB928064	80,11	77,64	75,26	73,44	72,34	69,84	68,86	68,01
RB867515	81,17	78,69	76,87	74,19	72,87	70,73	68,71	68,13
MÉDIA	80,17	77,57	75,17	72,99	71,57	69,39	68,52	68,09
DP	1,29	1,22	1,00	1,06	1,19	0,90	0,60	0,85
CV	1,60%	1,57%	1,34%	1,46%	1,66%	1,30%	0,88%	1,25%

Além da qualidade da matéria-prima, outro importante componente da produção final da cana-de-açúcar é a produtividade agrícola de colmos, conhecida por toneladas de colmo por hectare (TCH). Os valores de TCH obtidos ao longo do experimento apresentaram aumento até o período de maio-junho, sendo que a partir desses meses houve uma estabilização, tendendo a diminuir no final da safra (Figura 20 e Tabela 11).

Figura 20 - Produtividade de colmos por hectare (TCH) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

Tabela 11 - Produtividade de colmos por hectare (TCH) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

	TCH							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	122,0	134,3	133,4	129,4	118,9	129,7	113,9	108,5
SP90-3414	130,1	140,2	152,7	144,4	133,3	134,5	126,6	124,6
SP87-365	108,7	116,9	122,3	125,6	114,2	111,1	103,1	98,7
SP86-42	120,8	119,7	132,3	129,5	120,3	124,2	118,0	106,1
SP86-155	118,0	127,7	128,2	128,6	114,8	116,7	110,6	104,4
SP83-2847	134,2	129,4	124,2	121,9	115,9	123,5	109,7	102,6
RB928064	118,7	126,9	126,5	128,8	114,1	124,2	111,7	107,8
RB867515	124,7	134,8	147,3	141,3	126,8	133,7	123,2	116,9
MÉDIA	122,1	128,7	133,4	131,2	119,8	124,7	114,6	108,7
DP	7,8	7,8	11,0	7,7	6,9	8,0	7,7	8,3
CV	6,4%	6,1%	8,3%	5,8%	5,8%	6,5%	6,7%	7,7%

A cultivar de maior destaque foi a SP90-3414, com produtividade média de 136 t.ha⁻¹ e a de menor destaque a SP87-365 com 113 t.ha⁻¹. Ao contrário das variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima, a produtividade agrícola apresentou grande variação entre as cultivares e épocas do ano, não sendo possível identificar claramente uma tendência de aumento ou diminuição das diferenças entre as mesmas. Essa situação pode ser explicada pelo fato das variáveis meteorológicas, que determinam a produtividade agrícola (precipitação, temperatura do ar, entre outras), agirem de maneira oposta em relação ao acúmulo de sacarose nos colmos. Assim sendo, não é possível se obter valores máximos de produtividade agrícola com os maiores teores de sacarose, pois um dos processos sempre será beneficiado em detrimento do outro.

Diante disso, muitos autores preferem tratar da produtividade em termos de toneladas de Pol por hectare (TPH), variável resultante do TCH e da Pol%cana (MENDONÇA et al., 1984). Os valores de TPH são apresentados na Figura 21 e na Tabela 12, e mostram variação de 7,2 a 21, de acordo com a época e a cultivar considerada. Além disso, pode-se observar que os valores de TPH aumentaram até o mês de agosto, a partir de quando se estabilizaram ou decresceram. Pode-se observar também uma tendência de diminuição das diferenças entre as cultivares ao longo da safra, embora no mês de outubro a variação entre as mesmas tenha aumentado.

Figura 21 - Produtividade de Pol por hectare (TPH) ao longo dos meses da safra de 2003, para oito cultivares de cana-de-açúcar, cultivadas em Piracicaba, SP

Tabela 12 - Produtividade de Pol por hectare (TPH) ao longo dos meses de safra para oito cultivares de cana-de-açúcar

	TPH							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
SP91-1049	12,0	15,2	17,7	19,2	18,2	21,0	19,1	18,5
SP90-3414	9,4	12,8	17,2	19,0	19,2	21,1	21,0	21,3
SP87-365	7,2	10,8	13,3	15,8	15,2	16,8	16,6	16,4
SP86-42	7,3	10,2	13,6	15,9	15,9	18,3	18,6	17,5
SP86-155	10,2	13,0	16,1	17,8	17,4	18,4	17,9	17,5
SP83-2847	8,0	10,7	12,9	14,2	14,7	17,7	17,3	16,6
RB928064	8,4	12,1	15,0	16,0	15,3	18,9	17,6	18,0
RB867515	8,9	11,5	17,1	17,8	17,4	20,5	19,1	19,8
MÉDIA	8,9	12,0	15,3	17,0	16,7	19,1	18,4	18,2
DP	1,60	1,64	1,92	1,74	1,61	1,60	1,36	1,65
CV	17,87%	13,62%	12,49%	10,26%	9,68%	8,36%	7,41%	9,07%

4.3 Análise exploratória multivariada

4.3.1 Análise exploratória multivariada das variáveis tecnológicas

Os dendrogramas resultantes das análises de agrupamento por método hierárquico são apresentados na Figura 22, com cada gráfico representando um mês da safra (março a outubro). Como pode ser observado, em março as diferenças entre grupos, expressas pelas distâncias euclidianas e pelo posicionamento das cultivares, são muito mais evidentes do que nos demais meses, com as cultivares SP91-1049 e SP86-155 sobressaindo-se em termos de maturação, sendo mais precoces perante as demais. Um segundo grupo de cultivares (SP90-3414, SP87-365, RB928064, RB867515) compõe o de maturação intermediária (médias), com considerável diferença em relação às mais precoces. Finalmente, um terceiro grupo pode ser observado, de maturação mais tardia e formado pelas cultivares SP83-2847 e SP86-42. Segundo Horii (2004), as cultivares de cana-de-açúcar são agrupadas em precoces, quando apresentam um teor de Pol acima de 13% no início de maio, médias, quando atingem a maturação em julho, e tardias, quando o pico de maturação ocorre em agosto/setembro. Em abril e maio nota-se uma tendência de diminuição das diferenças (redução na distância euclidiana) entre os três grupos destacados, principalmente entre os de maturação média e tardia. A diminuição nas diferenças entre cultivares ocorreu concomitantemente à redução na disponibilidade hídrica, a qual é apresentada no balanço hídrico sequencial (Figura 23). No mês de março a disponibilidade hídrica era plena, contudo a partir de abril o déficit hídrico se intensificou até o final de maio. Segundo Robertson e Donaldson (1998), o déficit hídrico moderado promove aumentos na concentração de sacarose e teor de matéria seca de até 15%. Contudo, a partir de junho e julho, quando o esperado seria a intensificação da similaridade entre as cultivares, observou-se o contrário, ou seja, aparente aumento das diferenças entre grupos, expresso pelos valores de distância euclidiana, principalmente entre as cultivares precoces em relação às médias e tardias. Esse fato é explicado pela precipitação ocorrida ao final do mês de maio e início do mês de julho, visível no balanço hídrico sequencial (indicados pelas setas azuis 2 e 3) e que promoveram uma atenuação temporária da intensificação do déficit hídrico.

Figura 22 - Dendrogramas resultantes da análise de agrupamento por método hierárquico, construídos a partir de variáveis de qualidade da matéria prima de cultivares de cana-de-açúcar para cada mês da safra do ano de 2003, em Piracicaba, SP

O aumento da disponibilidade hídrica promoveu redução na qualidade da matéria-prima, aumento nos valores de açúcares redutores e redução nos teores de Pol%cana. Segundo Mamaet e Galwey (1999), a reação mais acentuada das cultivares precoces à elevação da disponibilidade hídrica deve-se às mesmas serem fisiologicamente mais preparadas para alternar as fases de crescimento vegetativo e maturação.

Figura 23 - Balanço hídrico climatológico sequencial de janeiro a dezembro de 2003 em Piracicaba, SP. Setas vermelhas indicam déficit hídrico e azuis ocorrência de chuvas diminuição do déficit hídrico)

A partir de julho, as condições de déficit hídrico se estabeleceram e alcançaram valores máximos em agosto-setembro (seta vermelha 2). Com isso, as diferenças entre as cultivares de todos os grupos de maturação se tornaram praticamente inexistentes, embora as cultivares mais ricas (p.e. SP91-1049) e mais pobres (SP83-2847) ainda tenham mantido suas posições dentro do grupo. Diante disso, pode-se dizer que o déficit hídrico, acumulado ao longo dos meses, tornou-se a variável mais importante para a maturação nesse momento da safra, o que já havia sido observado por Robertson e Donaldson (1998).

Apesar da forte influência do déficit hídrico no processo de maturação, fatores varietais também são importantes, pois dão a cultivar o potencial que será confirmado, ou não, pela ação do clima. Esse fato é confirmado por Stuppiello (1987), o qual relata que as cultivares médias jamais alcançaram os valores máximos das cultivares ricas (precoces), o mesmo acontecendo com as cultivares pobres (tardias) em relação às médias. Assim, a classificação de cultivares em precoces, médias e tardias é arbitrária e devida apenas à conveniência de manejo na safra, pois as cultivares precoces são naturalmente mais ricas que as demais (médias e tardias) e mantêm essas características a menos que haja alguma forma de degradação (florescimento, “isoporização” entre outros). No período de outubro-novembro, embora ainda tenha havido déficit hídrico, o volume de chuvas foi considerável (seta azul 4), fato que modificou as condições climáticas a que estavam expostas as últimas amostras de cana realizadas, com reflexos na qualidade do caldo e nos resultados da análise tecnológica, aumentando as diferenças entre os grupos, já que as cultivares precoces começaram a alternar seu comportamento de maturação para retomar o crescimento vegetativo mais rapidamente do que as cultivares tardias.

Para confirmar a ordenação das cultivares nos grupos de maturação precoce, média e tardia, obtida pela análise de agrupamento hierárquica, foi também realizada a análise de componentes principais para o início da safra (abril). A Figura 24 apresenta a dispersão da produtividade e qualidade de cada cultivar de cana-de-açúcar avaliada no início da safra (abril). Somente dois autovalores foram superiores a um, sendo o maior autovalor igual a 8,62 (componente com melhor retenção da variabilidade original) e segundo maior autovalor igual a 1,69 (componente com melhor retenção da variabilidade excluindo a variabilidade retida no primeiro componente). A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais, foi de 93,8% (CP1 = 78,38% e CP2 = 15,43%).

A representação gráfica (Figura 24) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 13) permitiram caracterizar quais cultivares apresentavam, no início de safra, características tecnológicas mais similares em termos de adequação ao processo industrial. A ordenação obtida foi idêntica à observada na

análise de agrupamento hierárquica no início de safra, sendo possível a identificação de três grupos de cultivares com características similares.

Figura 24 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima das cultivares de cana-de-açúcar estudadas, no início de safra de 2003, em Piracicaba, SP

Tabela 13 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e produtividade da matéria-prima de oito cultivares de cana-de-açúcar, colhidas na safra de 2003, em Piracicaba, SP

Variável	CP1	CP2
AR	0,9670	0,0739
PUR	-0,9623	-0,1231
ATR	-0,9873	-0,1314
Fibra	-0,2849	0,9567
Pol%Cana	-0,9907	-0,1256
Umidade	0,9590	0,2322
Brix	-0,9786	-0,0522

O Grupo I (precoces) compreendeu as cultivares SP91-1049 e SP86-155 e permaneceu à esquerda de CP1 relacionada às variáveis tecnológicas indicadoras de maturação da cana-de-açúcar (Brix, Pol%cana, ATR e Pureza). Enquanto isso, o Grupo

III (tardias), apresentou as cultivares SP83-2847 e SP86-42 à direita de CP1, próximas às variáveis relacionadas ao desenvolvimento vegetativo (açúcares redutores e umidade dos colmos), portanto com menor grau de maturação. O Grupo II (médias), composto pelas cultivares SP90-3414, SP87-365, RB867515 e RB928064, permaneceu em posição intermediária, mas também a direita de CP1. Embora estejam mais próximas do Grupo III, as cultivares do Grupo II demonstram tendência de se aproximarem das cultivares mais precoces. Ao contrário das demais variáveis tecnológicas, a variável fibra foi a única a apresentar maior valor de correlação com CP2. Contudo, não foi capaz de influenciar a formação de grupos, muito provavelmente pelo fato da fibra ser uma variável fortemente influenciada pelas características genéticas de cada cultivar.

Embora sejam úteis na visualização da composição dos grupos de cultivares com características mais similares, as análises de agrupamento hierárquica e de componentes principais não indicam as variáveis com maior peso na diferenciação dos grupos. Diante disso, realizou-se análise *k-means* (não-hierárquica) de forma a observar quais variáveis participavam mais efetivamente da diferenciação dos grupos ao longo da safra. Para tanto, selecionou-se três momentos da safra, denominados como início (abril-maio; outono), meio (julho-agosto; inverno) e final de safra (outubro; primavera), considerando-se, dessa forma, o número de grupos igual a três (precoces, médias e tardias). No início de safra, a organização das cultivares em grupos (Tabela 14) seguiu o mesmo padrão anteriormente obtido pelos dendogramas: Grupo 1 (precoces) composto pelas cultivares SP91-1049 e SP86-155; Grupo 2 (médias) composto por SP87-365, RB928064, SP90-3414 e RB867515; e Grupo 3 (tardias) composto por SP83-2847 e SP86-42.

Tabela 14 - Agrupamento de cultivares segundo análise de agrupamentos não-hierárquica *k-means* para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003, em Piracicaba, SP

Grupo	Cultivares
1	SP91-1049; SP86-155
2	SP90-3414; RB928064; SP87-365; RB867515
3	SP83-2847; SP86-42

De acordo com a análise de variância (Tabelas 15 e Figura 25), foi possível observar que, nesse momento, praticamente todas as variáveis consideradas foram úteis na discriminação de grupos (valores de F significativos a 5%). A exceção foi a fibra, a qual não apresentou variação significativa na discriminação dos grupos, ou seja, as cultivares apresentavam valores de fibra similares nesse momento da safra.

Figura 25 - Médias padronizadas das variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima no início de safra, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica *k-means* para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003, em Piracicaba, SP

Tabela 15 - Análise de variância das variáveis de qualidade da cana-de-açúcar dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos *k-means*

Variável	SQ Entre grupos	SQ Dentro dos grupos	F	Prob.
AR	1,3282	0,1293	25,69*	0,0023
Pureza	1,5143	0,1429	26,49*	0,0022
ATR	0,6045	0,0935	16,17*	0,0066
Fibra	0,4484	0,3882	2,89 ^{ns}	0,1467
Pol%cana	0,6426	0,0886	18,13*	0,0051
Umidade	0,5229	0,0287	45,49*	0,0006
BRIX	0,5027	0,0768	16,37*	0,0064

Graus de liberdade: entre grupos = 2; dentro dos grupos = 5.

Já no meio de safra, a discriminação de grupos foi bem menos evidente, havendo alterações nos componentes dos grupos anteriormente vistos. Como pode ser observado na Tabela 16, o Grupo 1 passou a ser constituído apenas pela cultivar SP91-1049; o Grupo 2 pelas cultivares SP86-155 e SP87-365; e o Grupo 3 pelas cultivares SP90-3414, RB928064, RB867515, SP83-2847 e SP86-42. De todas as cultivares analisadas, apenas o teor de fibra e a umidade foram efetivos na discriminação de grupos (Figura 26 e Tabela 17), não mais importando a quantidade de açúcares.

Tabela 16 - Agrupamento de cultivares segundo análise de agrupamentos não-hierárquica *k-means* para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003 em Piracicaba, SP

Meio de Safra	
Grupo	Cultivares
1	SP91-1049
2	SP86-155; SP87-365
3	SP90-3414; RB928064; RB867515; SP83-2847; SP86-42

Figura 26 - Médias padronizadas das variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima no meio de safra, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica *k-means* para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003, em Piracicaba, SP

Conforme visto anteriormente, nesse momento da safra não há sentido em falar em cultivares precoces, médias e tardias visto que dadas as condições meteorológicas vigentes ao longo dos meses, as diferenças entre as mesmas é praticamente inexistente. Assim, as diferenças observadas nos teores de fibra, embora sofram influência do clima e do período de safra, são fortemente influenciados pelas características genéticas de cada cultivar (FERNANDES, 2003).

Tabela 17 - Análise de variância das variáveis de qualidade da cana-de-açúcar dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos *k-means*

Variável	SQ Entre grupos	SQ Dentro dos grupos	F	Prob.
AR	0,0756	0,0561	3,3681 ^{ns}	0,1185
Pureza	0,0722	0,0689	2,6196 ^{ns}	0,1666
ATR	0,0938	0,0747	3,1382 ^{ns}	0,1309
Fibra	0,9901	0,1331	18,5995*	0,0048
Pol%cana	0,0902	0,0737	3,0607 ^{ns}	0,1355
Umidade	0,0967	0,0385	6,2795*	0,0533
BRIX	0,0593	0,0463	3,2018 ^{ns}	0,1273

Graus de liberdade: entre grupos = 2; dentro dos grupos = 5.

No final da safra há nova modificação na composição dos grupos (Tabela 18) e nas variáveis relevantes para a discriminação dos mesmos (Tabela 19 e Figura 27). Nesse caso, os grupos foram ordenados da seguinte forma: Grupo 1, composto pelas cultivares SP91-1049 e SP86-155; Grupo 2 composto por SP90-3414, SP87-365 e RB867515; e Grupo 3 composto por RB928064, SP83-2847 e SP86-42. Nesse caso, as variáveis relevantes para a discriminação dos grupos foram os teores de fibra, umidade e açúcares redutores. Conforme discutido no item anterior, o teor de fibra está fortemente influenciado pelas características das cultivares e, portanto, menos influenciados pelas variações nas condições meteorológicas. Enquanto isso, embora também sofram influência de características das cultivares, os teores de açúcares redutores e umidade são fortemente influenciados pelo clima. Durante a safra, os valores de umidade e açúcares redutores diminuíram em função da crescente restrição hídrica e redução da temperatura do ar, condições que restringem o desenvolvimento vegetativo. Contudo, ao final da safra com a elevação da temperatura do ar e aumento

da precipitação, há indução ao desenvolvimento vegetativo da planta, pela reidratação dos tecidos e inversão da sacarose (ALEXANDER, 1973).

Tabela 18 - Agrupamento de cultivares segundo análise de agrupamentos não-hierárquica *k-means* para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003 em Piracicaba, SP

Final de Safra	
Grupo	Cultivares
1	SP91-1049; SP86-155
2	SP90-3414; SP87-365; RB867515
3	RB928064; SP83-2847; SP86-42

Figura 27 - Médias padronizadas das variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima no final de safra, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica *k-means* para as oito cultivares de cana-de-açúcar analisadas na safra de 2003, em Piracicaba, SP

As cultivares do Grupo 1 (SP91-1049 e SP86-155) apresentaram aumento nos valores de umidade e açúcares redutores em relação ao mês anterior, sugerindo que sua precocidade as tornam mais sensíveis às variações das condições meteorológicas e mais sincronizadas para o crescimento vegetativo. Esse fato já foi ressaltado por autores como Venkataramana et al. (1991) e Mamet e Galwey (1999), segundo os quais

cultivares de maturação precoce são mais eficientes fisiologicamente e mais aptas a alternar mais rapidamente entre as fases vegetativa e de maturação.

Tabela 19 - Análise de variância para cada variável de qualidade da cana-de-açúcar dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos *k-means* ao final da safra

Variável	SQ Entre grupos	SQ Dentro dos grupos	F	Prob.
AR	0,0559	0,0161	8,6884 [*]	0,0236
Pureza	0,0432	0,0210	5,1478 ^{ns}	0,0611
ATR	0,0536	0,0375	3,5741 ^{ns}	0,1087
Fibra	1,3494	0,1014	33,2726 [*]	0,0013
Pol%cana	0,0509	0,0360	3,5358 ^{ns}	0,1104
Umidade	0,1358	0,0149	22,8353 [*]	0,0031
BRIX	0,0499	0,0215	5,7897 ^{ns}	0,0599

Graus de liberdade: entre grupos = 2; dentro dos grupos = 5.

4.3.2 Análise exploratória multivariada das variáveis tecnológicas e meteorológicas

As Figuras 28 a 35 apresentam a dispersão da produtividade e qualidade de cada cultivar de cana-de-açúcar avaliada ao longo dos meses da safra de 2003 e as variáveis meteorológicas que as influenciaram. A análise de componentes principais permitiu uma única distribuição das variáveis tecnológicas e meteorológicas (CP1 × CP2), visto que, em todos os casos, somente dois autovalores foram superiores a um. No caso da cultivar SP91-1049 (Figura 28), o maior autovalor foi igual a 19,96 (componente com melhor retenção da variabilidade original) e segundo maior autovalor igual a 1,68 (componente com melhor retenção da variabilidade excluindo a variabilidade retida no primeiro componente). A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais, foi de 94,1% (CP1 = 86,78% e CP2 = 7,34%).

Figura 28 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP91-1049, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP

Tabela 20 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP91-1049, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP

SP91-1049		
Variável	CP1	CP2
Açúcares redutores (AR)	0,9218	0,3359
Pureza (PUR)	-0,9168	-0,3455
Pol%Cana	-0,9934	-0,1052
ATR	-0,9931	-0,1087
Fibra	-0,9675	-0,1009
Umidade	0,9946	0,0866
Brix	-0,9970	-0,0727
Toneladas de Pol/ha (TPH)	-0,8429	-0,5148
Toneladas de colmos/ha (TCH)	0,4953	-0,8117
Temperatura do ar (Tar)	0,9902	-0,0797
Amplitude Térmica (AT)	-0,9819	0,1694
Umidade Relativa do ar (UR)	0,9941	-0,0797
Déficit de Pressão de Vapor (DPV)	-0,9493	0,1748
Radiação Solar Global (Rg)	0,8952	0,4207
Saldo de Radiação (Rn)	0,7535	-0,3434
Vento (u)	-0,6825	0,3359
Precipitação (Pp)	0,9917	-0,0491
Fotoperíodo (N)	0,9831	0,0890
Insolação (n)	-0,9696	-0,0161
Graus-dia negativos (GD)	-0,9323	0,2872
Horas de frio (HF)	-0,9899	0,1045
Déficit Hídrico (DEF)	-0,9668	0,2322
Excedente hídrico (EXC)	0,9852	0,0385

A representação gráfica (Figura 28) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 20) permitiram caracterizar quais variáveis meteorológicas estão mais relacionadas às variáveis de produtividade e de qualidade do caldo da cultivar SP91-1049. Há uma clara divisão entre as variáveis, sejam elas meteorológicas ou de matéria-prima, relacionadas aos processos de crescimento vegetativo e de maturação. À direita de CP1 (correlação positiva) concentraram-se as variáveis meteorológicas - radiação solar, saldo de radiação, fotoperíodo, excedente hídrico, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, e de matéria-prima -

umidade do colmo, açúcares redutores e TCH, relacionadas ao processo de crescimento vegetativo, o qual prevalece durante os meses de março, abril e maio. Por sua vez, à esquerda de CP1 (correlação negativa) ficaram as variáveis meteorológicas - graus-dia negativos, amplitude térmica, horas de frio, insolação, déficit de pressão de vapor, vento e déficit hídrico, e de matéria-prima - TPH, pureza, Pol%cana, Fibra, ATR, Brix, relacionadas ao processo de maturação, o qual predomina nos meses de julho, agosto, setembro e outubro. O mês de junho se apresentou como de transição entre os processos de crescimento vegetativo e maturação, sugerindo que nesse período os processos coexistiram.

No caso da cultivar SP86-155 (Figura 29), o maior autovalor foi igual a 20,28 e segundo maior autovalor igual a 1,59. A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais, foi de 95,1% (CP1 = 88,20% e CP2 = 6,92%). As informações contidas na Figura 29 e na Tabela 21 permitiram caracterizar quais variáveis meteorológicas estão mais relacionadas às variáveis de produtividade e de qualidade do caldo da cultivar SP86-155.

Figura 29 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP86-155, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP

Tabela 21 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP86-155, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP

SP86-155		
Variável	CP1	CP2
Açúcares redutores (AR)	0,9216	0,3623
Pureza (PUR)	-0,9156	-0,3739
Pol%Cana	-0,9972	-0,0630
ATR	-0,9977	-0,0615
Fibra	-0,9742	-0,1278
Umidade	0,9963	0,0525
Brix	-0,9991	-0,0172
Toneladas de Pol/ha (TPH)	-0,9116	-0,3984
Toneladas de colmos/ha (TCH)	0,4902	-0,8804
Temperatura do ar (Tar)	0,9925	-0,0704
Amplitude Térmica (AT)	-0,9857	0,1510
Umidade Relativa do ar (UR)	0,9945	-0,0546
Déficit de Pressão de Vapor (DPV)	-0,9501	0,1423
Radiação Solar Global (Rg)	0,8854	0,4546
Saldo de Radiação (Rn)	0,7691	-0,3382
Vento (u)	-0,6812	0,3747
Precipitação (Pp)	0,9927	-0,0178
Fotoperíodo (N)	0,9830	0,1106
Insolação (n)	-0,9694	-0,0514
Graus-dia negativos (GD)	-0,9378	0,2962
Horas de frio (HF)	-0,9926	0,0925
Déficit Hídrico (DEF)	-0,9725	0,2096
Excedente hídrico (EXC)	0,9860	0,0665

De forma semelhante a cultivar SP91-1049, as variáveis meteorológicas, como radiação solar, saldo de radiação, fotoperíodo, excedente hídrico, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, e as variáveis relacionadas a matéria-prima, tais como umidade do colmo, açúcares redutores e TCH, foram diretamente relacionadas e responsáveis pela discriminação do Grupo I (crescimento vegetativo) localizado à direita de CP1 (correlação positiva), predominando durante os meses de março, abril e maio. Por sua vez, à esquerda de CP1 (correlação negativa) ficaram as variáveis

meteorológicas, graus-dia negativos, amplitude térmica, horas de frio, insolação, déficit de pressão de vapor, vento, déficit hídrico, e de matéria-prima, TPH, pureza, Pol%cana, Fibra, ATR, Brix, relacionadas ao processo de maturação, que ocorreram durante os meses de julho, agosto, setembro e outubro. Novamente, o mês de junho apresentou-se como de transição entre os processos de crescimento vegetativo e maturação.

No caso da cultivar SP87-365 (Figura 30), os dois maiores autovalores foram iguais a 20,03 e 1,34. A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais, foi de 92,96% (CP1 = 87,13% e CP2 = 5,83%). A representação gráfica (Figura 30) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 22) permitiram identificar algumas alterações em relação às cultivares anteriormente analisadas.

Figura 30 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP87-365, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP

Tabela 22 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP87-365, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP

SP87-365		
Variável	CP1	CP2
Açúcares redutores (AR)	0,9366	0,0248
Pureza (PUR)	-0,9375	-0,0272
Pol%Cana	-0,9965	0,0077
ATR	-0,9972	-0,0133
Fibra	-0,9580	0,1449
Umidade	0,9935	-0,0090
Brix	-0,9969	-0,0215
Toneladas de Pol/ha (TPH)	-0,9686	0,1911
Toneladas de colmos/ha (TCH)	0,3884	0,8226
Temperatura do ar (Tar)	0,9903	0,0292
Amplitude Térmica (AT)	-0,9825	0,0913
Umidade Relativa do ar (UR)	0,9948	-0,0830
Déficit de Pressão de Vapor (DPV)	-0,9518	0,2798
Radiação Solar Global (Rg)	0,8909	0,3003
Saldo de Radiação (Rn)	0,7457	0,1864
Vento (u)	-0,7005	0,5135
Precipitação (Pp)	0,9897	0,0392
Fotoperíodo (N)	0,9794	0,1733
Insolação (n)	-0,9651	-0,1926
Graus-dia negativos (GD)	-0,9376	0,1212
Horas de frio (HF)	-0,9900	-0,0072
Déficit Hídrico (DEF)	-0,9663	0,1333
Excedente hídrico (EXC)	0,9809	0,1443

Embora as relações entre as variáveis meteorológicas e aquelas relacionadas à matéria-prima tenham se mantido praticamente as mesmas (variáveis relacionadas ao crescimento vegetativo localizadas à direita de CP1 e aquelas relacionadas à maturação à esquerda de CP1), houve alteração no posicionamento dos meses de safra em relação aos processos mencionados. Nesse caso, os meses de março, abril e maio continuaram como meses com predomínio do processo de crescimento vegetativo, enquanto que os meses de agosto, setembro e outubro com predomínio do

processo de maturação. Todavia, o período de transição entre esses processos, antes ocorrido em junho, agora passou a ocorrer entre junho e julho.

No caso da cultivar SP90-3414 (Figura 31), o maior autovalor foi igual a 20,12 e segundo maior autovalor igual a 1,73. A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais, foi de 95,0% (CP1= 87,47% e CP2 = 7,53%). A representação gráfica (Figura 31) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 23) permitiram caracterizar quais variáveis meteorológicas estão mais relacionadas às variáveis de produtividade e de qualidade do caldo da cultivar SP90-3414. De forma semelhante à cultivar SP86-365, as relações entre as variáveis meteorológicas e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima mantiveram-se similares às das cultivares precoces (SP-1049 e SP86-155), com variáveis relacionadas ao crescimento vegetativo localizadas à direita de CP1 e aquelas relacionadas à maturação à esquerda de CP1.

Figura 31 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP90-3414, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP

O posicionamento dos meses de safra em relação aos processos mencionados seguiu as alterações já observadas para a cultivar SP86-365. Assim, os meses de março, abril e maio continuaram como meses com predomínio do processo de crescimento vegetativo, enquanto os meses de agosto, setembro e outubro com predomínio do processo de maturação. Já o período de transição entre esses processos, antes ocorrido em junho, agora passou a ocorrer entre junho e julho.

Tabela 23 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP90-3414, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP

SP90-3414		
Variável	CP1	CP2
Açúcares redutores (AR)	0,9434	0,2991
Pureza (PUR)	-0,9435	-0,2994
Pol%Cana	-0,9975	-0,0634
ATR	-0,9976	-0,0633
Fibra	-0,9812	-0,1287
Umidade	0,9966	0,0743
Brix	-0,9986	-0,0463
Toneladas de Pol/ha (TPH)	-0,9222	-0,3799
Toneladas de colmos/ha (TCH)	0,4289	-0,8672
Temperatura do ar (Tar)	0,9926	-0,0848
Amplitude Térmica (AT)	-0,9850	0,1656
Umidade Relativa do ar (UR)	0,9946	-0,0448
Déficit de Pressão de Vapor (DPV)	-0,9495	0,1065
Radiação Solar Global (Rg)	0,8873	0,4304
Saldo de Radiação (Rn)	0,7647	-0,4431
Vento (u)	-0,6860	0,1998
Precipitação (Pp)	0,9926	-0,0232
Fotoperíodo (N)	0,9826	0,0695
Insolação (n)	-0,9699	-0,0723
Graus-dia negativos (GD)	-0,9387	0,2821
Horas de frio (HF)	-0,9925	0,1008
Déficit Hídrico (DEF)	-0,9707	0,2296
Excedente hídrico (EXC)	0,9853	0,0441

No caso da cultivar RB928064 (Figura 32), os dois maiores autovalores foram 20,02 e 1,61. A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais, foi de 94,08% (CP1 = 87,07% e CP2= 7,01%).

Figura 32 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar RB928064 e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP

A representação gráfica (Figura 32) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 24) permitiram observar que as relações entre as variáveis meteorológicas e aquelas relacionadas à qualidade da matéria-prima mantiveram-se similares às das demais cultivares analisadas, com visível agrupamento de variáveis relacionadas ao crescimento vegetativo à direita de CP1 e aquelas relacionadas à maturação à esquerda de CP1. O posicionamento dos meses de safra em relação aos processos mencionados seguiu as alterações já observadas nas cultivares médias (SP86-365 e SP90-3414). Assim sendo, os meses de março, abril e maio continuaram como meses com predomínio do processo de crescimento vegetativo, seguidos por um período de transição, entre junho e julho, e do processo de maturação, o qual se estendeu do mês de agosto a outubro.

Tabela 24 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar RB928064, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP

RB928064		
Variável	CP1	CP2
Açúcares redutores (AR)	0,9228	0,3480
Pureza (PUR)	-0,8873	-0,3876
Pol%Cana	-0,9932	-0,0712
ATR	-0,9897	-0,1260
Fibra	-0,9845	-0,0419
Umidade	0,9970	0,0367
Brix	-0,9979	-0,0263
Toneladas de Pol/ha (TPH)	-0,8959	-0,4256
Toneladas de colmos/ha (TCH)	0,5167	-0,8371
Temperatura do ar (Tar)	0,9909	-0,0695
Amplitude Térmica (AT)	-0,9849	0,1464
Umidade Relativa do ar (UR)	0,9961	-0,0545
Déficit de Pressão de Vapor (DPV)	-0,9554	0,1309
Radiação Solar Global (Rg)	0,8843	0,4300
Saldo de Radiação (Rn)	0,7504	-0,3691
Vento (u)	-0,7048	0,2950
Precipitação (Pp)	0,9908	-0,0298
Fotoperíodo (N)	0,9776	0,0929
Insolação (n)	-0,9654	-0,0144
Graus-dia negativos (GD)	-0,9407	0,2712
Horas de frio (HF)	-0,9912	0,0921
Déficit Hídrico (DEF)	-0,9699	0,2106
Excedente hídrico (EXC)	0,9806	0,0449

A cultivar RB867515 (Figura 33) apresentou os dois maiores autovalores, igual a 20,02 e 1,73. A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais, foi de 94,08% (CP1 = 87,07% e CP2 = 7,54%).

Figura 33 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar RB867515, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP

A representação gráfica (Figura 33) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 25) permitiram caracterizar, no caso da cultivar RB867515, que as relações entre as variáveis meteorológicas e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima mantiveram-se similares às demais cultivares médias (SP86-365, SP90-3414 e RB928064), com visível agrupamento de variáveis relacionadas ao crescimento vegetativo, à direita de CP1, e aquelas relacionadas à maturação, à esquerda de CP1. Novamente, os processos de crescimento vegetativo predominaram durante os meses de março, abril e maio, enquanto os meses de agosto, setembro e outubro estiveram mais relacionados ao processo de maturação. De forma semelhante às demais cultivares médias, o período de transição entre esses dois processos (crescimento e maturação) para a cultivar RB867515 ocorreu entre junho e julho.

Tabela 25 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar RB867515, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP

RB867515		
Variável	CP1	CP2
Açúcares redutores (AR)	0,9168	0,3629
Pureza (PUR)	-0,9119	-0,3748
Pol%Cana	-0,9958	-0,0573
ATR	-0,9966	-0,0553
Fibra	-0,9887	0,0067
Umidade	0,9976	0,0065
Brix	-0,9983	-0,0017
Toneladas de Pol/ha (TPH)	-0,9387	-0,3342
Toneladas de colmos/ha (TCH)	0,3846	-0,8823
Temperatura do ar (Tar)	0,9930	-0,0779
Amplitude Térmica (AT)	-0,9883	0,1327
Umidade Relativa do ar (UR)	0,9965	-0,0114
Déficit de Pressão de Vapor (DPV)	-0,9562	0,0342
Radiação Solar Global (Rg)	0,8751	0,4144
Saldo de Radiação (Rn)	0,7602	-0,4665
Vento (u)	-0,7084	0,1594
Precipitação (Pp)	0,9897	-0,0172
Fotoperíodo (N)	0,9764	0,0681
Insolação (n)	-0,9618	-0,0372
Graus-dia negativos (GD)	-0,9472	0,2772
Horas de frio (HF)	-0,9931	0,0915
Déficit Hídrico (DEF)	-0,9747	0,1830
Excedente hídrico (EXC)	0,9785	0,0424

A cultivar SP83-2847 (Figura 34) apresentou maior autovalor igual a 20,72 e segundo maior autovalor de 1,58. A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais, foi de 94,14% [90,08% (CP1) e 4,06% (CP2)].

Figura 34 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP83-2847, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP

A representação gráfica (Figura 34) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 26) permitiram identificar alterações em relação às cultivares anteriormente analisadas. Novamente, a relação entre as variáveis meteorológicas e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima mantiveram-se praticamente iguais (variáveis relacionadas ao crescimento vegetativo localizadas à direita de CP1 e aquelas relacionadas à maturação à esquerda de CP1), porém houve alteração no posicionamento dos meses de safra em relação aos processos mencionados. Nesse caso, os meses de março, abril, maio continuaram como meses com predomínio do processo de crescimento vegetativo, porém houve a inserção do mês de junho como parte daqueles onde predomina os processos vegetativos. Enquanto isso, os meses de agosto, setembro e outubro mantiveram-se com o predomínio do processo de maturação. O período de transição entre esses processos, antes ocorrido em junho-julho, agora passou a ocorrer predominantemente em julho. Esse fato ajuda a compreender o porquê da menor precocidade da cultivar SP83-2847 em relação as demais cultivares, visto que sua interação com o ambiente permite que a mesma prolongue seu ciclo, acumule mais biomassa e atinja valores próximos a seu

pico de maturação mais tardiamente. Porém, o ápice de maturação da cultivar SP83-2847 é muito similar aos das demais cultivares, ocorrendo no período agosto-setembro. Esse fato leva a uma provocação: seria a cultivar SP83-2847 realmente “pobre” em termos de acúmulo de sacarose, como é tradicionalmente considerada no setor canavieiro, ou apenas menos sensível às variáveis meteorológicas que levam à maturação e, portanto, necessitando de um período maior de tempo para amadurecer?

Tabela 26 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP83-2847, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP

Variável	SP83-2847	
	CP1	CP2
Açúcares redutores (AR)	0,9490	-0,0310
Pureza (PUR)	-0,9471	0,0365
Pol%Cana	-0,9946	0,0804
ATR	-0,9955	0,0573
Fibra	-0,9875	0,0541
Umidade	0,9964	-0,0588
Brix	-0,9967	0,0664
Toneladas de Pol/ha (TPH)	-0,9433	-0,0829
Toneladas de colmos/ha (TCH)	0,4455	-0,8677
Temperatura do ar (Tar)	0,9907	0,0706
Amplitude Térmica (AT)	-0,9859	-0,0010
Umidade Relativa do ar (UR)	0,9970	-0,0379
Déficit de Pressão de Vapor (DPV)	-0,9586	0,1965
Radiação Solar Global (Rg)	0,8778	0,2332
Saldo de Radiação (Rn)	0,7483	0,4032
Vento (u)	-0,7163	0,6666
Precipitação (Pp)	0,9890	0,1006
Fotoperíodo (N)	0,9742	0,2152
Insolação (n)	-0,9629	-0,1754
Graus-dia negativos (GD)	-0,9440	0,0911
Horas de frio (HF)	-0,9912	-0,0570
Déficit Hídrico (DEF)	-0,9717	0,0056
Excedente hídrico (EXC)	0,9774	0,2017

No caso da cultivar SP86-42 (Figura 35), o maior autovalor foi de 20,23 (componente com melhor retenção da variabilidade original) e segundo maior autovalor 1,57 (componente com melhor retenção da variabilidade excluindo a variabilidade retida no primeiro componente). A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais, foi de 94,82% (CP1 = 87,99% e CP2 = 6,83%).

Figura 35 - Dispersão (gráfico biplot) das variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP86-42, e das variáveis meteorológicas ao longo dos meses de safra, em 2003, em Piracicaba, SP

A representação gráfica (Figura 35) e a correlação das variáveis nos componentes principais (Tabela 27) permitiram caracterizar quais variáveis meteorológicas estão mais relacionadas às variáveis de produtividade e de qualidade do caldo da cultivar SP86-42. De forma semelhante à cultivar SP83-2847, a relação entre as variáveis meteorológicas e as variáveis relacionadas à matéria-prima mantiveram-se similares às demais cultivares analisadas, com as variáveis relacionadas ao crescimento vegetativo localizadas à direita de CP1 e aquelas relacionadas à maturação à esquerda de CP1. Contudo, o posicionamento dos meses de safra em

relação aos processos mencionados seguiu as alterações já observadas para a cultivar SP83-2847. Os meses de março, abril, maio continuaram como meses com predomínio do processo de crescimento vegetativo, porém com a inserção do mês de junho como parte daqueles onde predominam os processos vegetativos, seguidos por um período de transição em julho, e do processo de maturação, predominante nos meses de agosto, setembro e outubro.

Tabela 27 - Correlação entre cada componente principal e as variáveis relacionadas à qualidade e à produtividade da matéria-prima da cana-de-açúcar, cultivar SP86-42, e as variáveis meteorológicas, em 2003, em Piracicaba, SP

Variável	SP86-42	
	CP1	CP2
Açúcares redutores (AR)	0,9643	0,2289
Pureza (PUR)	-0,9647	-0,2286
Pol%Cana	-0,9970	-0,0517
ATR	-0,9976	-0,0487
Fibra	-0,9838	-0,1101
Umidade	0,9970	0,0595
Brix	-0,9988	-0,0379
Toneladas de Pol/ha (TPH)	-0,9468	-0,3013
Toneladas de colmos/ha (TCH)	0,3865	-0,8768
Temperatura do ar (Tar)	0,9926	-0,0749
Amplitude Térmica (AT)	-0,9863	0,1358
Umidade Relativa do ar (UR)	0,9952	-0,0363
Déficit de Pressão de Vapor (DPV)	-0,9529	0,0889
Radiação Solar Global (Rg)	0,8766	0,4057
Saldo de Radiação (Rn)	0,7699	-0,2860
Vento (u)	-0,6964	0,3782
Precipitação (Pp)	0,9929	0,0151
Fotoperíodo (N)	0,9788	0,1014
Insolação (n)	-0,9717	-0,1007
Graus-dia negativos (GD)	-0,9428	0,3075
Horas de frio (HF)	-0,9935	0,0840
Déficit Hídrico (DEF)	-0,9736	0,1745
Excedente hídrico (EXC)	0,9843	0,0965

Embora existam algumas diferenças em função da precocidade das cultivares, os padrões dos processos de crescimento vegetativo e maturação foram bastante semelhantes em todos os casos analisados. Existem dois momentos bastante distintos durante a safra, nos quais as variáveis meteorológicas e as que expressam a qualidade da matéria-prima apresentam forte agrupamento. Nos períodos em que predominam temperaturas mais elevadas, maiores precipitações e maior disponibilidade de radiação solar (março, abril e maio) observa-se crescimento vegetativo e, conseqüentemente, altos valores de umidade nos colmos, teores de açúcares redutores e aumento na produtividade de colmos por hectare (TCH).

A partir dos meses de junho e julho, em que houve diminuição das temperaturas, redução das chuvas e da radiação solar, as plantas de cana-de-açúcar modificaram seu metabolismo básico, destinando os fotossintatos produzidos para os tecidos de armazenamento. Mesmo com a redução do processo de crescimento, a fotossíntese continua ocorrendo enquanto houver folhas verdes e condições ambientais favoráveis, com a produção de sacarose que vai se acumulando nos espaços disponíveis nos internódios dos colmos (NAGUMO, 1993). Ocorre então, mesmo com a paralisação do crescimento vegetativo, a elevação da matéria-seca acumulada, formada basicamente pela sacarose.

A extensão desse período de crescimento vegetativo para os meses de maio, junho ou julho é fortemente dependente não apenas das variáveis climáticas, mas também das características de cada cultivar. Segundo Brodie et al. (1969), há uma sensibilidade diferenciada, na qual uma cultivar pode responder a uma variável ambiental e não a outra, ou apenas responder à combinação de certos eventos meteorológicos. Dessa forma, a variável genética aparenta ter efeito sobre a sensibilidade com a qual as cultivares alternam os processos de crescimento vegetativo e maturação, determinando até quando haverá crescimento vegetativo, acúmulo de sacarose (maturação) ou retomada do crescimento.

4.4 Correlações entre variáveis tecnológicas e meteorológicas

4.4.1 Correlações entre variáveis meteorológicas “simples” e variáveis tecnológicas

4.4.1.1 Temperatura do ar

As correlações lineares de Pearson entre os valores médios de temperatura máxima, mínima, média e amplitude térmica (AT) e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar são apresentadas nas Tabelas 28, 29, 30 e 31. Como pode ser observado, também foram realizadas correlações para cada cultivar e grupo das mesmas (precoces, médias e tardias), seguindo ordenação sugerida pela análise de clusters e componentes principais do mês de abril.

Tabela 28 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a temperatura máxima média (°C) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Temperatura Máxima													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,8072	150	-0,9385	150	-0,9475	150	-0,8182	150	-0,9360	150	-0,7878	150	0,93491	150
SP86-155	0,8039	150	-0,9336	150	-0,9441	150	-0,8012	150	-0,9317	150	-0,7813	150	0,93221	150
SP90-3414	0,8829	150	-0,9533	150	-0,9598	150	-0,8242	150	-0,9524	150	-0,8769	150	0,92231	150
SP87-365	0,8642	150	-0,9431	150	-0,9508	150	-0,7614	150	-0,9416	150	-0,8591	150	0,93571	150
RB867515	0,8686	150	-0,9397	150	-0,9404	150	-0,7772	150	-0,9392	150	-0,8611	150	0,92231	150
RB928064	0,8454	150	-0,8959	150	-0,9393	150	-0,8037	150	-0,9302	150	-0,7994	150	0,93221	150
SP86-42	0,8727	150	-0,9228	150	-0,9348	150	-0,8278	150	-0,9220	150	-0,8658	150	0,92920	150
SP83-2847	0,8716	150	-0,9132	150	-0,9225	150	-0,8083	150	-0,9134	150	-0,8551	150	0,91868	150
Precoces	0,7975	150	-0,9139	150	-0,9344	150	-0,6490	150	-0,9137	150	-0,7791	150	0,92516	150
Médias	0,8375	150	-0,9339	150	-0,9405	150	-0,7525	150	-0,9265	150	-0,8220	150	0,92442	150
Tardias	0,8655	150	-0,9102	150	-0,9254	150	-0,7717	150	-0,9103	150	-0,8551	150	0,92338	150
Geral	0,7936	150	-0,8968	150	-0,9153	150	-0,7168	150	-0,8948	150	-0,7757	150	0,89893	150

valores de p significativos a 1%.

Tabela 29 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a temperatura mínima média (°C) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Temperatura Mínima													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,8220	120	-0,9526	120	-0,9606	120	-0,8465	150	-0,9502	120	-0,8032	120	0,9498	120
SP86-155	0,8171	120	-0,9523	120	-0,9611	120	-0,8139	120	-0,9502	120	-0,7959	120	0,9480	120
SP90-3414	0,8949	120	-0,9701	150	-0,9773	150	-0,8453	150	-0,9677	150	-0,8898	120	0,9625	150
SP87-365	0,8748	120	-0,9601	150	-0,9668	150	-0,8040	150	-0,9576	150	-0,8706	120	0,9566	150
RB867515	0,8761	120	-0,9713	150	-0,9761	150	-0,8354	150	-0,9682	150	-0,8681	120	0,9625	150
RB928064	0,8519	120	-0,9570	150	-0,9671	150	-0,8476	150	-0,9544	150	-0,8041	120	0,9628	150
SP86-42	0,8902	120	-0,9555	150	-0,9631	150	-0,8487	150	-0,9533	150	-0,8847	120	0,9546	150
SP83-2847	0,8797	120	-0,9573	150	-0,9637	150	-0,8530	150	-0,9556	150	-0,8717	120	0,9597	150
Precoces	0,8113	120	-0,9301	120	-0,9495	120	-0,6623	120	-0,9299	120	-0,7940	120	0,9404	120
Médias	0,8463	120	-0,9567	150	-0,9646	150	-0,7918	150	-0,9533	150	-0,8306	120	0,9576	150
Tardias	0,8819	120	-0,9483	150	-0,9601	150	-0,8036	150	-0,9468	150	-0,8727	120	0,9568	150
Geral	0,8049	120	-0,9201	150	-0,9387	150	-0,7466	150	-0,9167	150	-0,7874	120	0,9263	150

valores de p significativos a 1%.

Tabela 30 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a temperatura média (°C) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Temperatura Média													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,8085	120	-0,9469	150	-0,9571	150	-0,8437	150	-0,9441	150	-0,7900	120	0,9475	150
SP86-155	0,8087	120	-0,9507	150	-0,9617	150	-0,8111	150	-0,9478	150	-0,7870	120	0,9472	150
SP90-3414	0,8863	120	-0,9710	150	-0,9781	150	-0,8445	150	-0,9692	150	-0,8810	120	0,9559	150
SP87-365	0,8681	150	-0,9610	150	-0,9680	150	-0,7956	150	-0,9588	150	-0,8632	150	0,9562	150
RB867515	0,8432	150	-0,9676	150	-0,9710	150	-0,8220	150	-0,9653	150	-0,8562	150	0,9559	150
RB928064	0,8432	150	-0,9547	150	-0,9643	150	-0,8392	150	-0,9526	150	-0,7976	150	0,9592	150
SP86-42	0,8825	150	-0,9511	150	-0,9602	150	-0,8475	150	-0,9493	150	-0,8771	150	0,9526	150
SP83-2847	0,8763	150	-0,9490	150	-0,9565	150	-0,8443	150	-0,9480	150	-0,8684	150	0,9526	150
Precoces	0,801	120	-0,9267	150	-0,9483	150	-0,6624	150	-0,9259	150	-0,7832	120	-0,9397	150
Médias	0,836	150	-0,9556	150	-0,9632	150	-0,7844	150	-0,9527	150	-0,8204	150	-0,9508	150
Tardias	0,876	150	-0,9420	150	-0,9550	150	-0,7986	150	-0,9410	150	-0,8674	150	0,9522	150
Geral	0,7953	150	-0,9186	150	-0,9374	150	-0,7422	150	-0,9156	150	-0,7778	150	0,9237	150

valores de p significativos a 1%.

As variáveis Brix, Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra apresentaram relação inversamente proporcional aos valores de temperatura do ar (máxima, mínima e média), ou seja, seus valores aumentaram com a redução da temperatura. Os melhores ajustes

foram obtidos para as variáveis Brix, Pol%cana e ATR, com valores superiores a 0,90. As variáveis Pureza e Fibra apresentaram os menores coeficientes de correlação, os quais oscilaram entre 0,78 a 0,88. As variáveis umidade e açúcares redutores (AR) apresentaram relação diretamente proporcional com a temperatura do ar, ou seja, com a redução da temperatura do ar, essas variáveis também diminuiram. Nesse caso, os maiores coeficientes de correlação foram observados com a variável umidade ($r > 0,9$) enquanto os açúcares redutores apresentaram menores coeficientes de correlação, com r entre 0,8 e 0,89.

A amplitude térmica apresentou relação diretamente proporcional aos valores de Brix, Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra, ou seja, seus valores aumentaram com o aumento da amplitude térmica. Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos para as variáveis Brix, Pol%cana e ATR, com valores superiores a 0,94, enquanto que as variáveis Pureza e Fibra apresentaram menores coeficientes de correlação linear, os quais oscilaram entre 0,8 a 0,9.

Tabela 31 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a amplitude térmica média ($^{\circ}\text{C}$) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Amplitude Térmica (AT)													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	-0,8593	60	0,9402	120	0,9490	120	0,8564	120	0,9376	120	0,8450	60	-0,9436	120
SP86-155	-0,8690	60	0,9495	120	0,9584	120	0,8105	120	0,9465	120	0,8520	60	-0,9438	120
SP90-3414	-0,9224	60	0,9671	120	0,9734	120	0,8540	120	0,9650	120	0,9184	60	-0,9664	120
SP87-365	-0,8837	60	0,9601	120	0,9653	120	0,8214	120	0,9580	120	0,8813	60	-0,9594	120
RB867515	-0,8886	60	0,9748	120	0,9782	120	0,8460	120	0,9718	120	0,8839	60	-0,9664	120
RB928064	-0,8664	60	0,9565	120	0,9657	120	0,8611	120	0,9540	120	0,8121	60	-0,9646	120
SP86-42	-0,9019	60	0,9558	120	0,9614	120	0,8468	120	0,9535	120	0,8970	60	-0,9525	120
SP83-2847	-0,8790	60	0,9615	120	0,9660	120	0,8644	120	0,9599	120	0,8714	60	-0,9640	120
Precoces	-0,8562	60	0,9230	120	0,9429	120	0,6665	120	0,9223	120	0,8434	60	-0,9353	120
Médias	-0,8612	60	0,9567	120	0,9635	120	0,8036	120	0,9535	120	0,8459	60	-0,9607	120
Tardias	-0,8871	60	0,9505	120	0,9604	120	0,8087	120	0,9490	120	0,8783	60	-0,9579	120
Geral	-0,8210	60	0,9206	120	0,9378	120	0,7548	120	0,9173	120	0,8044	60	-0,9281	120

valores de p significativos a 1%.

As variáveis umidade e açúcares redutores (AR) apresentaram relação inversamente proporcional à amplitude térmica, ou seja, com o aumento da amplitude térmica, essas variáveis tiveram seus valores reduzidos. Nesse caso, os melhores

ajustes foram observados com a variável umidade (acima de -0,9) enquanto que para AR foram observados os menores coeficientes de correlação (-0,8 a -0,82).

Os resultados obtidos confirmam os efeitos da diminuição da temperatura sobre a mudança do processo de crescimento vegetativo para a maturação da cana-de-açúcar. Segundo Alexander e Samuels (1968) e Ebrahim et al. (1998), a redução da temperatura do ar promove diminuição na concentração de invertase ácida nos colmos, aumento na concentração de invertase neutra e consequente aumento no conteúdo de sacarose nos colmos. Todavia, a diminuição dos teores de invertase ácida só ocorre com a redução prolongada da temperatura (LINGLE, 2004). Essa condição foi observada no presente estudo, pois em todos os casos os melhores ajustes foram obtidos quando se considerou os valores médios de temperatura do ar dos 120 a 150 dias anteriores às amostragens, havendo alterações em função da variável considerada e das cultivares. Esse fato também foi observado por Clements (1962), o qual relatou que um dos mais importantes fatores associados ao amadurecimento da cana-de-açúcar é a temperatura média dos três meses anteriores à colheita. Glasziou et al. (1965) mostraram que níveis relativamente altos de açúcar foram produzidos quando a temperatura do ar foi reduzida durante um longo período de tempo. Segundo esses autores, quando a temperatura média do ar foi reduzida durante um período relativamente longo de tempo (3 a 6 meses), a concentração de açúcar chegou a 17% de peso fresco. Baseado nesses resultados, Glasziou et al. (1964) descartou a crença de que variações diárias na temperatura do ar são indutoras da maturação da cana-de-açúcar, exceto se as mesmas forem mantidas por um longo período de tempo acima de três meses.

4.4.1.2 Precipitação

As correlações lineares de Pearson entre a precipitação acumulada e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar são apresentadas na Tabela 32. Os resultados indicam que há grande correlação entre a precipitação acumulada em períodos anteriores às amostragens e as variáveis relacionadas à maturação da cana-de-açúcar, sendo que os períodos de 120 e 150 dias de antecedência foram os que permitiram as maiores correlações na maioria dos casos.

As variáveis Brix, Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra apresentaram relação inversamente proporcional à precipitação acumulada. As melhores correlações (acima de -0,95) foram encontradas entre as variáveis Brix, Pol%cana e ATR e a precipitação acumulada nos últimos 120 dias para as cultivares precoces e 150 dias para as médias e tardias. Para as variáveis Pureza e Fibra observaram-se os menores coeficientes de correlação, com r entre 0,81 e 0,92.

As variáveis umidade e açúcares redutores (AR) apresentaram relação diretamente proporcional com a precipitação, ou seja, com a redução das chuvas, essas variáveis também diminuíram. Nesse caso, os maiores coeficientes de correlação foram observados com a variável umidade ($r > 0,95$) enquanto os açúcares redutores apresentaram menores valores de correlação ($r > 0,9$). As variáveis AR e pureza apresentaram os maiores coeficientes de correlação considerando-se menores períodos de tempo anteriores às amostragens tecnológicas. Isso sugere que tais variáveis são mais sensíveis às variações nas condições meteorológicas do que as demais variáveis tecnológicas analisadas.

Tabela 32 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a precipitação acumulada (mm) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Precipitação													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,9090	60	-0,9717	120	-0,9686	120	-0,8529	120	-0,9717	120	-0,9022	60	0,9601	120
SP86-155	0,9091	60	-0,9593	120	-0,9568	120	-0,8151	150	-0,9602	150	-0,8988	60	0,9496	150
SP90-3414	0,9522	120	-0,9810	150	-0,9851	150	-0,8675	150	-0,9803	150	-0,9477	120	0,9579	150
SP87-365	0,9274	120	-0,9706	150	-0,9746	150	-0,8107	150	-0,9696	150	-0,9234	120	0,9652	150
RB867515	0,9314	120	-0,9729	150	-0,9719	150	-0,8264	150	-0,9718	150	-0,9263	120	0,9579	150
RB928064	0,9214	120	-0,9344	150	-0,9660	150	-0,8493	150	-0,9627	150	-0,8733	120	0,9631	150
SP86-42	0,9369	120	-0,9653	150	-0,9707	150	-0,8557	150	-0,9646	150	-0,9319	120	0,9631	150
SP83-2847	0,9284	120	-0,9563	150	-0,9588	150	-0,8567	150	-0,9566	150	-0,9218	120	0,9578	150
Precoces	0,9002	60	-0,9423	120	-0,9534	120	-0,6734	120	-0,9449	120	-0,8945	60	0,9458	120
Médias	0,9027	120	-0,9638	150	-0,9672	150	-0,7959	150	-0,9622	150	-0,8879	120	0,9573	150
Tardias	0,9295	120	-0,9527	150	-0,9613	150	-0,8085	150	-0,9529	150	-0,9212	120	0,9599	150
Geral	0,8590	120	-0,9285	150	-0,9421	150	-0,7509	150	-0,9268	150	-0,8426	120	0,9288	150

valores de p significativos a 1%.

Os resultados obtidos reforçam os efeitos da redução da disponibilidade hídrica no processo de maturação da cana-de-açúcar. De acordo com Humbert (1968), a disponibilidade hídrica é um dos principais fatores relacionados à maturação da cana-de-açúcar em regiões onde não há significativa redução da temperatura do ar. Por outro lado, Legendre (1975) não encontrou correlação entre precipitação e maturação, porém em seu trabalho o autor considerou apenas as correlações entre os valores mensais de precipitação e de amostras tecnológicas de algumas cultivares, não considerando o efeito acumulativo da precipitação de meses anteriores à colheita sobre a qualidade da matéria-prima.

4.4.1.3 Umidade Relativa do ar e Déficit de Pressão de Vapor

As correlações lineares de Pearson entre valores médios de umidade relativa do ar máxima, mínima e média e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar são apresentadas nas Tabelas 33, 34 e 35. As variáveis Brix, Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra apresentaram relação inversamente proporcional aos valores de umidade do ar (máxima, mínima e média), com os maiores coeficientes de correlação ($r > 0,9$) sendo observados quando a umidade relativa do ar foi considerada com 120 a 150 dias de antecedência às amostragens. As correlações com as variáveis Pureza e Fibra apresentaram as menores correlações, as quais oscilaram entre 0,76 a 0,95. As variáveis umidade e açúcares redutores (AR) apresentaram relação diretamente proporcional com a umidade relativa do ar, sendo os maiores valores de correlação observados com a variável umidade ($r > 0,9$), enquanto a correlação com os açúcares redutores permaneceu entre 0,8 e 0,95. Em todos os casos, a umidade relativa mínima do ar apresentou maiores correlações ($r > 0,95$) em relação às demais variáveis de umidade do ar avaliadas, sendo, portanto, mais adequada que as demais para representar o processo de maturação da cana-de-açúcar.

Tabela 33 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a umidade relativa máxima média (%) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Umidade Relativa Máxima													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,8076	120	-0,8880	150	-0,8957	150	-0,8406	150	-0,8862	150	-0,7930	120	0,8975	150
SP86-155	0,7673	120	-0,9036	150	-0,9113	150	-0,7728	150	-0,9004	150	-0,7542	120	0,8968	150
SP90-3414	0,8341	120	-0,9268	150	-0,9332	150	-0,8271	150	-0,9243	150	-0,8308	120	0,9450	150
SP87-365	0,8490	120	-0,9230	150	-0,9277	150	-0,8298	150	-0,9212	150	-0,8437	120	0,9304	150
RB867515	0,8377	120	-0,9468	150	-0,9510	150	-0,8503	150	-0,9433	150	-0,8291	120	0,9450	150
RB928064	0,8319	120	-0,9341	150	-0,9416	150	-0,8546	150	-0,9316	150	-0,8089	120	0,9427	150
SP86-42	0,8527	120	-0,9321	150	-0,9327	150	-0,8307	150	-0,9296	150	-0,8522	120	0,9250	150
SP83-2847	0,8745	120	-0,9539	150	-0,9546	150	-0,8580	150	-0,9517	150	-0,8730	120	0,9520	150
Precoces	0,7777	120	-0,8754	150	-0,8935	150	-0,6438	150	-0,8748	150	-0,7664	120	0,8892	150
Médias	0,8112	120	-0,9250	150	-0,9314	150	-0,7982	150	-0,9216	150	-0,8008	120	0,9374	150
Tardias	0,8615	120	-0,9350	150	-0,9406	150	-0,7984	150	-0,9332	150	-0,8582	120	0,9384	150
Geral	0,7760	120	-0,8906	150	-0,9057	150	-0,7439	150	-0,8873	150	-0,7640	120	0,9015	150

valores de p significativos a 1%.

Tabela 34 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a umidade relativa mínima média (%) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

	Umidade Relativa Mínima													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,9213	60	-0,9694	120	-0,9700	120	-0,8751	120	-0,9687	120	-0,9090	60	0,9654	120
SP86-155	0,9088	60	-0,9684	120	-0,9690	120	-0,8358	120	-0,9679	120	-0,8938	60	0,9596	120
SP90-3414	0,9593	60	-0,9845	120	-0,9873	120	-0,8815	120	-0,9845	120	-0,9543	60	0,9656	120
SP87-365	0,9472	60	-0,9752	120	-0,9777	120	-0,8365	120	-0,9751	120	-0,9418	60	0,9741	120
RB867515	0,9494	60	-0,9817	120	-0,9775	120	-0,8451	120	-0,9816	120	-0,9454	60	0,9656	120
RB928064	0,9508	60	-0,9698	120	-0,9716	120	-0,8654	120	-0,9700	120	-0,9078	60	0,9713	120
SP86-42	0,9389	60	-0,9721	120	-0,9755	120	-0,8695	120	-0,9717	120	-0,9336	60	0,9699	120
SP83-2847	0,9438	60	-0,9675	120	-0,9685	120	-0,8743	120	-0,9684	120	-0,9374	60	0,9697	120
Precoces	0,9055	60	-0,9461	120	-0,9580	120	-0,6845	120	-0,9476	120	-0,8947	60	0,9537	120
Médias	0,9206	60	-0,9697	120	-0,9713	120	-0,8134	120	-0,9689	120	-0,9066	60	0,9654	120
Tardias	0,9385	60	-0,9616	120	-0,9686	120	-0,8235	120	-0,9623	120	-0,9302	60	0,9693	120
Geral	0,8734	60	-0,9348	120	-0,9471	120	-0,7678	120	-0,9337	120	-0,8575	60	0,9373	120

valores de p significativos a 1%.

Tabela 35 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a umidade relativa média (%) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Umidade Relativa Média													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,8698	60	-0,9538	120	-0,9554	120	-0,8739	120	-0,9530	120	-0,8534	60	0,9531	120
SP86-155	0,8411	60	-0,9574	120	-0,9587	120	-0,8210	120	-0,9561	120	-0,8233	60	0,9471	120
SP90-3414	0,9108	60	-0,9763	120	-0,9798	120	-0,8744	120	-0,9756	120	-0,9054	60	0,9711	120
SP87-365	0,9195	60	-0,9690	120	-0,9717	120	-0,8466	120	-0,9684	120	-0,9125	60	0,9709	120
RB867515	0,9154	60	-0,9826	120	-0,9807	120	-0,8562	120	-0,9814	120	-0,9083	60	0,9711	120
RB928064	0,9134	60	-0,9690	120	-0,9717	120	-0,8716	120	-0,9684	120	-0,8819	60	0,9720	120
SP86-42	0,9130	60	-0,9697	120	-0,9713	120	-0,8634	120	-0,9686	120	-0,9085	60	0,9644	120
SP83-2847	0,9293	60	-0,9761	120	-0,9758	120	-0,8784	120	-0,9761	120	-0,9237	60	0,9753	120
Precoces	0,8456	60	-0,9333	120	-0,9459	120	-0,6774	120	-0,9343	120	-0,8312	60	0,9414	120
Médias	0,8853	60	-0,9662	120	-0,9688	120	-0,8193	120	-0,9646	120	-0,8724	60	0,9677	120
Tardias	0,9192	60	-0,9646	120	-0,9702	120	-0,8230	120	-0,9646	120	-0,9129	60	0,9696	120
Geral	0,8404	60	-0,9311	120	-0,9436	120	-0,7687	120	-0,9294	120	-0,8250	60	0,9359	120

valores de p significativos a 1%.

No caso do déficit de pressão do vapor (DPV), as correlações com as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar são apresentadas na Tabela 36. Para as variáveis Brix, Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra foi observada relações diretamente proporcionais com o DPV, com os melhores ajustes sendo obtidos para as variáveis Brix, Pol%cana e ATR (superiores a 0,90), considerando-se os períodos de antecedência de 90 a 120 dias. No caso das variáveis Pureza e Fibra foram observadas as menores correlações lineares, as quais oscilaram entre 0,78 e 0,88. As variáveis umidade e açúcares redutores (AR) apresentaram relação inversa ao DPV, com maiores os coeficientes de correlação sendo observados com a variável umidade ($r < -0,9$), enquanto que os açúcares redutores apresentaram os menores coeficientes de correlações, entre -0,79 e -0,88. Novamente, as variáveis AR e Pureza apresentaram os coeficientes de correlação mais elevados, considerando-se menores períodos de tempo (90 dias) anteriores às amostragens tecnológicas.

Tabela 36 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre o déficit de pressão de vapor (DPV, em kPa) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Déficit de Pressão de Vapor (DPV)													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	-0,8321	90	0,8802	120	0,8779	120	0,8423	120	0,8805	120	0,8217	90	0,8779	120
SP86-155	-0,7971	90	0,8908	120	0,8871	120	0,7690	120	0,8900	120	0,7879	90	-0,8777	120
SP90-3414	-0,8453	90	0,9063	120	0,9080	120	0,8366	120	0,9056	120	0,8425	90	-0,9236	120
SP87-365	-0,8613	90	0,9054	120	0,9050	120	0,8440	120	0,9056	120	0,8568	90	-0,9162	120
RB867515	-0,8409	90	0,9296	120	0,9261	120	0,8413	120	0,9280	120	0,8358	90	-0,9236	120
RB928064	-0,8559	90	0,9137	120	0,9135	120	0,8550	120	0,9133	120	0,8189	90	-0,9208	120
SP86-42	-0,8677	90	0,9175	120	0,9123	120	0,8153	120	0,9162	120	0,8679	90	-0,9054	120
SP83-2847	-0,8831	90	0,9375	120	0,9313	120	0,8591	120	0,9371	120	0,8817	90	-0,9345	120
Precoces	-0,8048	90	0,8651	120	0,8725	120	0,6426	120	0,8667	120	0,7977	90	-0,8728	120
Médias	-0,8229	90	0,9062	120	0,9064	120	0,8018	120	0,9049	120	0,8099	90	-0,9178	120
Tardias	-0,8731	90	0,9196	120	0,9187	120	0,7924	120	0,9193	120	0,8701	90	-0,9199	120
Geral	-0,7895	90	0,8751	120	0,8829	120	0,7438	120	0,8736	120	0,7769	90	-0,8834	120

valores de p significativos a 1%.

Embora inversamente proporcionais, a umidade relativa do ar e o déficit de pressão de vapor estão diretamente relacionados à demanda atmosférica por vapor d'água. Quanto maior a demanda atmosférica, maior o potencial para perda de umidade pela cana-de-açúcar, a qual tentará controlar o mesmo pelo fechamento de seus estômatos. Dessa forma, em condições de maior demanda atmosférica e menor precipitação, entre os meses de maio e setembro, ocorre a redução na disponibilidade hídrica para as plantas, com consequente estímulo à maturação. Nessas condições, cultivares que fecham rapidamente os estômatos, reduzindo ao mínimo as perdas de água, tendem a ser mais tardias e com maior produtividade agrícola (AZEVEDO, 1981).

4.4.1.4 Radiação solar, saldo de radiação, fotoperíodo e insolação

As correlações lineares de Pearson entre as variáveis meteorológicas radiação solar (Rg), saldo de radiação (Rn) e fotoperíodo (N) e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar são apresentadas nas Tabelas 37, 38 e 39.

Tabela 37 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a radiação solar global (Rg, em MJm²dia⁻¹) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Radiação Global (Rg)													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,8948	150	-0,8659	150	-0,8446	150	-0,7110	150	-0,8697	150	-0,8918	150	0,8320	150
SP86-155	0,8983	150	-0,8213	150	-0,8005	150	-0,7139	150	-0,8277	150	-0,8915	150	0,8032	150
SP90-3414	0,9140	150	-0,8346	150	-0,8288	150	-0,7529	150	-0,8404	150	-0,9107	150	0,7561	150
SP87-365	0,8728	150	-0,8248	150	-0,8233	150	-0,6685	150	-0,8296	150	-0,8700	150	0,8166	150
RB867515	0,8889	150	-0,7951	150	-0,7728	150	-0,6168	150	-0,8036	150	-0,8906	150	0,7561	150
RB928064	0,8982	150	-0,8022	150	-0,7849	150	-0,6664	150	-0,8100	150	-0,8502	150	0,7813	150
SP86-42	0,8566	150	-0,7954	150	-0,7991	150	-0,7214	150	-0,8004	150	-0,8514	150	0,8011	150
SP83-2847	0,8535	150	-0,7646	150	-0,7602	150	-0,6772	150	-0,7727	150	-0,8482	150	0,7641	150
Precoces	0,8880	150	-0,8220	150	-0,8107	150	-0,5720	150	-0,8289	150	-0,8859	150	0,8089	150
Médias	0,8639	150	-0,8072	150	-0,7963	150	-0,6429	150	-0,8131	150	-0,8515	150	0,7737	150
Tardias	0,8523	150	-0,7734	150	-0,7768	150	-0,6585	150	-0,7802	150	-0,8447	150	0,7818	150
Geral	0,8177	150	-0,7784	150	-0,7775	150	-0,6168	150	-0,7835	150	-0,8043	150	0,7621	150

valores de p significativos a 1%.

Tabela 38 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre o saldo de radiação (Rn), em MJm²dia⁻¹) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Saldo de Radiação (Rn)													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,5746	90	-0,7507	120	-0,7769	120	-0,6383	120	-0,7438	120	-0,5602	90	0,7575	120
SP86-155	0,6220	90	-0,7705	120	-0,7985	120	-0,6538	120	-0,7641	120	-0,6023	90	0,7809	120
SP90-3414	0,6678	90	-0,7790	120	-0,7900	120	-0,6385	120	-0,7745	120	-0,6636	90	0,7466	120
SP87-365	0,6008	90	-0,7510	120	-0,7605	120	-0,5283	120	-0,7450	120	-0,6012	90	0,7275	120
RB867515	0,6157	90	-0,7532	120	-0,7674	120	-0,6108	120	-0,7470	120	-0,6129	90	0,7466	120
RB928064	0,5773	90	-0,7347	120	-0,7573	120	-0,6180	120	-0,7282	120	-0,5139	90	0,7439	120
SP86-42	0,6581	120	-0,7535	120	-0,7714	120	-0,6700	120	-0,7499	120	-0,6511	120	0,7629	120
SP83-2847	0,6013	120	-0,7137	120	-0,7333	120	-0,6374	120	-0,7094	120	-0,5895	120	0,7283	120
Precoces	0,5950	90	-0,7435	120	-0,7794	120	-0,5195	120	-0,7387	120	-0,5799	90	0,7635	120
Médias	0,5951	90	-0,7484	120	-0,7633	120	-0,5700	120	-0,7421	120	-0,5796	90	0,7386	120
Tardias	0,6262	120	-0,7274	120	-0,7495	120	-0,6159	120	-0,7237	120	-0,6150	120	0,7448	120
Geral	0,5654	90	-0,7205	120	-0,7470	120	-0,5580	120	-0,7144	120	-0,5489	90	0,7253	120

valores de p significativos a 1%.

Tabela 39 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre o fotoperíodo (N, em horas) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Fotoperíodo (N)													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	0,8484	150	-0,9502	150	-0,9524	150	-0,8234	150	-0,9490	150	-0,8326	150	0,9404	150
SP86-155	0,8529	150	-0,9411	150	-0,9441	150	-0,8124	150	-0,9409	150	-0,8339	150	0,9357	150
SP90-3414	0,9158	150	-0,9557	150	-0,9587	150	-0,8383	150	-0,9563	150	-0,9110	150	0,9106	150
SP87-365	0,8839	150	-0,9397	150	-0,9437	150	-0,7560	150	-0,9394	150	-0,8805	150	0,9294	150
RB867515	0,8888	150	-0,9331	150	-0,9282	150	-0,7654	150	-0,9341	150	-0,8831	150	0,9106	150
RB928064	0,8698	150	-0,9003	150	-0,9274	150	-0,7953	150	-0,9255	150	-0,8162	150	0,9214	150
SP86-42	0,8997	150	-0,9280	150	-0,9369	150	-0,8341	150	-0,9284	150	-0,8938	150	0,9329	150
SP83-2847	0,8811	150	-0,9040	150	-0,9097	150	-0,8088	150	-0,9058	150	-0,8728	150	0,9096	150
Precoces	0,8426	150	-0,9231	150	-0,9366	150	-0,6559	150	-0,9244	150	-0,8280	150	0,9295	150
Médias	0,8606	150	-0,9305	150	-0,9325	150	-0,7500	150	-0,9302	150	-0,8447	150	0,9143	150
Tardias	0,8871	150	-0,9082	150	-0,9199	150	-0,7746	150	-0,9097	150	-0,8775	150	0,9205	150
Geral	0,8186	150	-0,8965	150	-0,9104	150	-0,7182	150	-0,8958	150	-0,8011	150	0,8940	150

valores de p significativos a 1%.

As variáveis Brix, Pol%cana, ATR, pureza e fibra apresentaram relação inversamente proporcional aos valores de radiação solar (Rg), saldo de radiação e fotoperíodo (N), com melhores ajustes obtidos para as variáveis Brix, Pol%cana e ATR considerando-se os períodos de 90 a 150 dias anteriores às amostragens. As variáveis radiação solar (-0,8 a -0,9) e saldo de radiação (-0,7 a -0,8) apresentaram coeficientes de correlação inferiores aos obtidos pelo fotoperíodo (acima de -0,9) em relação as variáveis Brix, Pol%cana e ATR. As variáveis pureza e fibra apresentaram os menores coeficientes de correlação linear, os quais oscilaram entre -0,52 a -0,89. As variáveis umidade e açúcares redutores (AR) apresentaram relação diretamente proporcional às variáveis Rg, Rn e N, com melhores ajustes observados com a variável umidade, com r de 0,72 a 0,94, enquanto que para os açúcares redutores os coeficientes de correlação foram menores, oscilando entre 0,57 e 0,91.

As correlações lineares de Pearson entre valores de insolação (n) e razão de insolação (n/N) e as variáveis relacionadas a qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar são apresentadas nas Tabelas 40 e 41. As variáveis Brix, Pol%cana, ATR, pureza e fibra apresentaram relação diretamente proporcional aos valores de n e n/N, com melhores ajustes obtidos para as variáveis Brix, Pol%cana e ATR ($r > 0,93$) considerando-se o período de 150 dias anteriores à amostragem. As variáveis pureza e

fibra apresentaram os menores coeficientes de correlação linear, os quais oscilaram entre 0,75 a 0,91. As variáveis AR e umidade de colmos apresentaram relação inversamente proporcional à n e à n/N , com os melhores ajustes sendo observados com a variável umidade ($r > 0,90$), enquanto que para a variável AR os valores de r ficaram entre 0,85 e 0,91.

Tabela 40 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre a insolação (n) em períodos anteriores às amostragens (T , em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas

Cultivares	Insolação (n)													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	-0,8718	120	0,9396	150	0,9375	150	0,8008	150	0,9387	150	0,8642	120	-0,9228	150
SP86-155	-0,8931	120	0,9294	150	0,9282	150	0,7818	150	0,9292	150	0,8826	120	-0,9151	150
SP90-3414	-0,9016	150	0,9538	150	0,9563	150	0,8228	150	0,9538	150	0,8984	150	-0,9058	150
SP87-365	-0,8645	150	0,9296	150	0,9331	150	0,7380	150	0,9288	150	0,8627	150	-0,9161	150
RB867515	-0,8652	150	0,9243	150	0,9219	150	0,7683	150	0,9244	150	0,8590	150	-0,9058	150
RB928064	-0,8696	150	0,8877	150	0,9241	150	0,7768	150	0,9259	150	0,8039	150	-0,9140	150
SP86-42	-0,9114	150	0,9369	150	0,9422	150	0,8371	150	0,9374	150	0,9070	150	-0,9375	150
SP83-2847	-0,8783	150	0,9099	150	0,9120	150	0,7996	150	0,9112	150	0,8723	150	-0,9083	150
Precoces	-0,8749	120	0,9122	150	0,9214	150	0,6342	150	0,9136	150	0,8688	120	-0,9104	150
Médias	-0,8460	150	0,9254	150	0,9269	150	0,7387	150	0,9246	150	0,8280	150	-0,9068	150
Tardias	-0,8912	150	0,9155	150	0,9238	150	0,7712	150	0,9169	150	0,8835	150	-0,9221	150
Geral	-0,8111	150	0,8935	150	0,9052	150	0,7063	150	0,8926	150	0,7939	150	-0,8866	150

valores de p significativos a 1%.

Tabela 41 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a razão de insolação (n/N) em períodos anteriores às amostragens (T , em dias) e os as variáveis tecnológicas analisadas

Cultivares	Razão de Insolação (n/N)													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	-0,8544	120	0,9539	150	0,9545	150	0,8201	150	0,9526	150	0,8441	120	-0,9409	150
SP86-155	-0,8745	120	0,9446	150	0,9461	150	0,8045	150	0,9442	150	0,8603	120	-0,9349	150
SP90-3414	-0,9149	150	0,9643	150	0,9674	150	0,8383	150	0,9644	150	0,9108	150	-0,9188	150
SP87-365	-0,8813	150	0,9447	150	0,9487	150	0,7556	150	0,9440	150	0,8786	150	-0,9329	150
RB867515	-0,8836	150	0,9391	150	0,9359	150	0,7761	150	0,9395	150	0,8774	150	-0,9188	150
RB928064	-0,8755	150	0,9035	150	0,9360	150	0,7957	150	0,9353	150	0,8156	150	-0,9281	150
SP86-42	-0,9117	150	0,9415	150	0,9489	150	0,8429	150	0,9418	150	0,9065	150	-0,9442	150
SP83-2847	-0,8866	150	0,9168	150	0,9211	150	0,8130	150	0,9182	150	0,8793	150	-0,9191	150
Precoces	-0,8570	120	0,9266	150	0,9387	150	0,6512	150	0,9278	150	0,8476	120	-0,9293	150
Médias	-0,8595	150	0,9378	150	0,9400	150	0,7527	150	0,9371	150	0,8424	150	-0,9210	150
Tardias	-0,8957	150	0,9213	150	0,9316	150	0,7806	150	0,9225	150	0,8869	150	-0,9309	150
Geral	-0,8206	150	0,9043	150	0,9176	150	0,7197	150	0,9033	150	0,8030	150	-0,9000	150

valores de p significativos a 1%.

As relações encontradas corroboram os resultados obtidos por outros autores (CLEMENTS, 1940; ALEXANDER, 1973; GLASZIOU et al., 1965; SHAW, 1953), os quais demonstraram a importância da radiação solar e do fotoperíodo no amadurecimento da cana-de-açúcar. Clements (1940), ao analisar diferenças entre cultivares de cana-de-açúcar entre duas localidades no Havaí, relatou que os níveis de sacarose foram maiores em áreas onde a radiação solar foi mais intensa (devido à ausência de nuvens), apesar de a umidade do solo nas duas áreas ser a mesma nos três meses que antecederam à colheita. Shaw (1953) relatou que valores máximos de acúmulo de sacarose foram encontrados nas latitudes de 18°N e 18°S e sugeriu que esse efeito era devido muito mais à duração do dia (fotoperíodo) ao longo do período crítico à maturação do que à temperatura do ar. Entretanto, Glasziou et al. (1965) sugeriram que os efeitos observados por Shaw (1953) foram devidos a uma combinação ótima entre as variações sazonais da temperatura do ar e do fotoperíodo nesses locais.

4.4.1.5 Velocidade do vento

As correlações lineares de Pearson entre a velocidade do vento e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar são apresentadas na Tabela 42. As variáveis Brix, Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra apresentaram relação diretamente proporcional aos valores de velocidade do vento, com coeficientes de correlação inferiores aos observados para todas as outras variáveis climáticas analisadas, com r variando entre 0,60 e 0,75. As variáveis Pureza e Fibra apresentaram a mesma tendência observada para as demais variáveis climáticas analisadas, com menores coeficientes de correlação, que oscilaram entre 0,45 e 0,69. As variáveis umidade e AR apresentaram relação inversamente proporcional à velocidade do vento com os melhores ajustes observados com a variável umidade, com r entre -0,62 e -0,74, enquanto que para os açúcares redutores os coeficientes de correlação foram ainda menores (-0,45 a -0,63).

Tabela 42 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a velocidade do vento (u, em m.s⁻¹) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP

Cultivares	Vento (u)													
	AR		ATR		BRIX		FIBRA		Pol%Cana		Pureza		Umidade	
	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T	r	T
SP91-1049	-0,5158	60	0,6086	60	0,6210	60	0,6216	60	0,6067	60	0,4988	60	-0,6296	60
SP86-155	-0,4510	60	0,6305	60	0,6429	60	0,5252	60	0,6253	60	0,4362	60	-0,6252	60
SP90-3414	-0,5309	60	0,6641	60	0,6742	60	0,5884	60	0,6595	60	0,5264	60	-0,7311	60
SP87-365	-0,5944	60	0,6815	60	0,6902	60	0,6791	60	0,6788	60	0,5857	60	-0,7046	60
RB867515	-0,5738	60	0,7164	60	0,7288	60	0,6922	60	0,7108	60	0,5627	60	-0,7311	60
RB928064	-0,5789	60	0,6452	60	0,7214	60	0,6795	60	0,7062	60	0,5855	60	-0,7255	60
SP86-42	-0,5796	60	0,6815	60	0,6799	60	0,6019	60	0,6774	60	0,5790	60	-0,6710	60
SP83-2847	-0,6304	60	0,7511	60	0,7506	60	0,6594	60	0,7464	60	0,6301	60	-0,7415	60
Precoces	-0,4753	60	0,6059	60	0,6255	60	0,4550	60	0,6036	60	0,4610	60	-0,6217	60
Médias	-0,5519	60	0,6871	60	0,6983	60	0,6259	60	0,6825	60	0,5461	60	-0,7207	60
Tardias	-0,6045	60	0,7102	60	0,7133	60	0,5979	60	0,7063	60	0,6024	60	-0,7068	60
Geral	-0,5245	60	0,6564	60	0,6715	60	0,5634	60	0,6519	60	0,5161	60	-0,6760	60

valores de p significativos a 1%.

A relação encontrada pode ser explicada pelo efeito da velocidade do vento na demanda hídrica atmosférica. O vento ajuda a remover o vapor d'água do ar próximo às plantas para outras regiões, impedindo a saturação do microclima próximo às mesmas. Outro fator de grande importância é a advecção (transporte horizontal de energia de uma área mais seca para outra mais úmida), a qual intensifica a demanda evapotranspirativa (PEREIRA et al., 2002). Assim sendo, com o aumento da velocidade de vento houve aumento na evapotranspiração da cultura, a qual quando não atendida, em virtude da redução da precipitação ao longo da safra, estimula o processo de maturação da cana-de-açúcar.

4.4.2 Correlações entre variáveis meteorológicas “complexas” e variáveis tecnológicas

4.4.2.1 Graus-dia negativos, horas de frio e temperatura noturna

As correlações lineares de Pearson entre os valores de graus-dia negativos, horas de frio e temperatura noturna e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar são apresentadas nas Tabelas 43, 44 e 45. As variáveis Brix,

Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra apresentaram relação diretamente proporcional aos valores acumulados de graus-dia negativos e horas de frio, com maiores coeficientes de correlação ($r > 0,9$) sendo observados quando se considerou valores acumulados de 120 (precoces) a 150 dias (médias e tardias) anteriores às amostragens. As variáveis Pureza e Fibra apresentaram menores coeficientes de correlação, os quais oscilaram entre 0,64 a 0,85. As variáveis umidade e açúcares redutores (AR) apresentaram relação inversamente proporcional aos valores acumulados de graus-dia negativos e horas de frio, com os maiores coeficientes de correlação observados com a variável umidade, com r variando de -0,88 a -0,96. Os açúcares redutores apresentaram menores valores de r , entre -0,67 e -0,91. De modo geral, as menores correlações foram obtidas quando se considerou a soma de graus dia negativos como variável climática.

As temperaturas-base entre 17 e 22°C foram as que propiciaram somatórios de horas de frio e de graus-dia negativos com maior correlação com as variáveis tecnológicas avaliadas na cultura da cana-de-açúcar. Todavia, o somatório do NHF permitiu distinção de maior número de temperaturas-base (18 a 22°C) para as cultivares avaliadas, enquanto que a soma de graus-dia negativos indicou apenas duas temperaturas-base (21 e 22°C). As cultivares precoces (SP91-1049 e SP86-155) apresentaram maiores valores de temperatura-base (20 a 21°C), enquanto que as cultivares médias e tardias tenderam a apresentar valores menores (18 a 20°C). Esse fato ajuda a compreender a precocidade de algumas cultivares em relação a outras, visto que quanto maior a temperatura-base, mais facilmente o crescimento vegetativo será reduzido diante de reduções na temperatura do ar. Cultivares tardias tendem a ser menos sensíveis que as precoces em relação à redução da temperatura do ar e, portanto, continuam seu crescimento por mais tempo, retardando sua maturação. Em trabalho realizado com cultivares de amendoim, Cardozo (2008) relatou que a temperatura-base varia de acordo com a cultivar analisada e estágio fenológico, com valores mais altos de temperatura-base observados em cultivares de maior precocidade.

Tabela 43 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre o acúmulo de graus-dia negativos em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. Tb é a temperatura-base que propiciou o melhor ajuste

Cultivares	Graus-dia Negativos																				
	AR			ATR			BRIX			FIBRA			Pol%Cana			PUREZA			UMIDADE		
	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T
SP91-1049	21	-0,6794	120	22	0,8758	120	22	0,8973	120	22	0,7704	120	22	0,8705	120	21	0,6554	120	22	-0,8828	120
SP86-155	21	-0,6703	120	22	0,8875	150	22	0,9081	150	22	0,7406	150	22	0,8815	150	21	0,6435	120	22	-0,8862	150
SP90-3414	21	-0,7729	120	22	0,9139	150	22	0,9258	150	22	0,7776	150	22	0,9092	150	21	0,7666	120	22	-0,9302	150
SP87-365	21	-0,7766	150	22	0,9117	150	22	0,9229	150	22	0,7646	150	22	0,9071	150	21	0,7704	150	22	-0,9112	150
RB86 7515	21	-0,7665	150	22	0,9295	150	22	0,9435	150	22	0,8120	150	22	0,9236	150	21	0,7542	150	22	-0,9302	150
RB92 8064	21	-0,7420	150	22	0,9121	150	22	0,9304	150	22	0,8139	150	22	0,9069	150	21	0,7056	150	22	-0,9248	150
SP86-42	21	-0,7870	150	22	0,8977	150	22	0,9087	150	22	0,7886	150	22	0,8935	150	21	0,7821	150	22	-0,8968	150
SP83-2847	21	-0,7943	150	22	0,9215	150	22	0,9304	150	22	0,8066	150	22	0,9168	150	21	0,7868	150	22	-0,9208	150
Precoce	21	-0,6679	120	22	0,8610	120	22	0,8934	120	22	0,6060	120	22	0,8574	120	21	0,6448	120	22	-0,8785	120
Média	21	-0,7384	150	22	0,9092	150	22	0,9237	150	22	0,7525	150	22	0,9035	150	21	0,7235	150	22	-0,9209	150
Tardia	21	-0,7884	150	22	0,9010	150	22	0,9165	150	22	0,7539	150	22	0,8972	150	21	0,7800	150	22	-0,9087	150
Geral	21	-0,7013	150	22	0,8706	150	22	0,8950	150	22	0,7027	150	22	0,8650	150	21	0,6844	150	22	-0,8829	150

valores de p significativos a 1%.

Tabela 44 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre o número de horas de frio (NHF) em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. Tb é a temperatura-base que propiciou melhor ajuste

Cultivares	N° de Horas de Frio (NHF)																				
	AR			ATR			BRIX			FIBRA			Pol%Cana			PUREZA			UMIDADE		
	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T	Tb	r	T
SP91-1049	21	-0,8611	90	21	0,9523	150	21	0,9607	150	19	0,8471	150	21	0,9497	150	21	0,8505	90	21	-0,9507	150
SP86-155	20	-0,8700	90	20	0,9545	150	20	0,9640	150	20	0,8159	150	20	0,9519	150	20	0,8554	90	20	-0,9502	150
SP90-3414	20	-0,9164	120	20	0,9740	150	20	0,9805	150	20	0,8501	150	20	0,9723	150	20	0,9123	120	20	-0,9564	150
SP87-365	20	-0,8837	120	20	0,9635	150	20	0,9699	150	20	0,7995	150	20	0,9615	150	20	0,8802	120	20	-0,9586	150
RB86 7515	18	-0,8820	120	18	0,9711	150	18	0,9746	150	18	0,8293	150	18	0,9686	150	18	0,8751	120	18	-0,9602	150
RB92 8064	19	-0,8590	120	19	0,9583	150	19	0,9675	150	19	0,8460	150	19	0,9562	150	19	0,8082	120	19	-0,9631	150
SP86-42	19	-0,8948	120	19	0,9564	150	19	0,9645	150	19	0,8514	150	19	0,9545	150	19	0,8889	120	19	-0,9567	150
SP83-2847	18	-0,8786	120	18	0,9547	150	18	0,9614	150	18	0,8516	150	18	0,9536	150	18	0,8720	120	18	-0,9580	150
Precoces	21	-0,8714	90	21	0,9275	150	21	0,9446	150	21	0,7825	150	21	0,9267	150	21	0,8607	90	21	-0,9054	150
Médias	19	-0,8525	120	19	0,9585	150	19	0,9658	150	19	0,7903	150	19	0,9555	150	19	0,8368	120	19	-0,9570	150
Tardias	18	-0,8835	120	18	0,9474	150	18	0,9596	150	18	0,8041	150	18	0,9464	150	18	0,8740	120	18	-0,9569	150
Geral	19	-0,8108	120	19	0,9218	150	19	0,9401	150	19	0,7467	150	19	0,9187	150	19	0,7933	120	19	-0,9270	150

valores de p significativos a 1%.

De forma semelhante às demais variáveis relacionadas à temperatura do ar (mínima, média e máxima), a temperatura noturna apresentou correlação inversamente proporcional às variáveis Brix, Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra, com $r > -0,95$ para as variáveis Brix, Pol%cana e ATR, enquanto que para as variáveis Fibra e Pureza os valores de r oscilaram entre -0,79 e -0,86. As variáveis açúcares redutores e umidade

de colmos apresentaram relação diretamente proporcional à temperatura noturna, com os melhores ajustes observados com a variável umidade ($r > 0,94$) enquanto que para os açúcares redutores os coeficientes de correlação foram menores, com r entre 0,81 e 0,88. Além disso, os melhores ajustes foram obtidos quando se considerou o intervalo das 21 h de um dia até as 6 h do dia seguinte, para a determinação da temperatura noturna, e períodos de 120 (AR e Pureza) a 150 dias (ATR, Brix, Pol%cana, Umidade e Fibra) precedendo as amostragens tecnológicas.

Tabela 45 - Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) obtidos entre a temperatura noturna em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. Int. é o intervalo de tempo considerado para determinação da temperatura noturna, sendo que o Int. IV representa o intervalo que corresponde ao período das 21 h de um dia às 6h do dia seguinte

Cultivares	Temperatura Noturna																				
	AR			ATR			BRIX			FIBRA			Pol% Cana			PUREZA			UMIDADE		
	Int.	r	T	Int.	r	T	Int.	r	T	Int.	r	T	Int.	r	T	Int.	r	T	Int.	r	T
SP91-1049	IV	0,8151	120	IV	-0,9426	150	IV	-0,9532	150	IV	-0,8457	150	IV	-0,9448	150	IV	-0,7963	120	IV	0,9446	150
SP86-155	IV	0,8129	120	IV	-0,9494	150	IV	-0,9607	150	IV	-0,8080	150	IV	-0,9461	150	IV	-0,7914	120	IV	0,9452	150
SP90-3414	IV	0,8908	120	IV	-0,9701	150	IV	-0,9774	150	IV	-0,8447	150	IV	-0,9679	150	IV	-0,8856	120	IV	0,9608	150
SP87-365	IV	0,8667	120	IV	-0,9603	150	IV	-0,9671	150	IV	-0,8016	150	IV	-0,9578	150	IV	-0,8627	120	IV	0,9565	150
RB86 7515	IV	0,8698	120	IV	-0,9703	150	IV	-0,9749	150	IV	-0,8318	150	IV	-0,9674	150	IV	-0,8620	120	IV	0,9608	150
RB92 8064	IV	0,8446	120	IV	-0,9563	150	IV	-0,9665	150	IV	-0,8455	150	IV	-0,9537	150	IV	-0,7955	120	IV	0,9620	150
SP86-42	IV	0,8846	120	IV	-0,9540	150	IV	-0,9621	150	IV	-0,8482	150	IV	-0,9519	150	IV	-0,8787	120	IV	0,9539	150
SP83-2847	IV	0,8705	120	IV	-0,9549	150	IV	-0,9618	150	IV	-0,8506	150	IV	-0,9533	150	IV	-0,8622	120	IV	0,9578	150
Precoces	IV	0,8059	120	IV	-0,9240	150	IV	-0,9460	150	IV	-0,6616	150	IV	-0,9230	150	IV	-0,7884	120	IV	0,9366	150
Médias	IV	0,8400	120	IV	-0,9563	150	IV	-0,9643	150	IV	-0,7897	150	IV	-0,9530	150	IV	-0,8242	120	IV	0,9565	150
Tardias	IV	0,8744	120	IV	-0,9463	150	IV	-0,9586	150	IV	-0,8022	150	IV	-0,9450	150	IV	-0,8649	120	IV	0,9554	150
Geral	IV	0,7987	120	IV	-0,9147	150	IV	-0,9384	150	IV	-0,7454	150	IV	-0,9162	150	IV	-0,7810	120	IV	0,9256	150

valores de p significativos a 1%.

4.4.1.2 Déficit e excedente hídrico

As correlações lineares de Pearson entre valores de déficit e excedente hídricos e as variáveis relacionadas à qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar são apresentadas nas Tabelas 46 e 47. Os resultados indicam que há grande correlação entre as condições de disponibilidade hídrica regional (déficit e excedente hídricos acumulados) e as variáveis indicadoras da maturação da cana-de-açúcar, apesar das variações decorrentes das diferenças devido às cultivares e às variáveis tecnológicas consideradas. O déficit hídrico apresentou relação diretamente proporcional às variáveis Brix, Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra, com maiores coeficientes de correlação ($r > 0,95$)

encontrados para as variáveis Brix, Pol%cana e ATR. Já as variáveis Fibra e Pureza apresentaram menores coeficientes de correlação com o déficit hídrico acumulado, com r entre 0,78 e 0,89. As variáveis açúcares redutores e umidade de colmos apresentaram relação inversamente proporcional ao déficit hídrico, com os melhores ajustes observados com a variável umidade ($r < -0,92$) enquanto que os açúcares redutores apresentaram menores valores de coeficiente de correlação, com r entre -0,81 e -0,87.

Tabela 46 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre o déficit hídrico acumulado em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. CAD é a capacidade de água disponível que gerou o melhor ajuste (mm)

Cultivares	Déficit hídrico																							
	AR			ATR			BRIX			FIBRA			Pol%Cana			PUREZA			UMIDADE					
	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T
SP91-1049	75	-0,8242	30	75	0,9344	30	75	0,9362	30	75	0,8402	30	75	0,9328	30	75	0,8101	30	75	-0,9295	30			
SP86-155	75	-0,8155	30	75	0,9419	30	75	0,9433	30	75	0,7988	30	75	0,9401	30	75	0,8008	30	75	-0,9291	30			
SP90-3414	75	-0,8757	30	75	0,9554	60	75	0,9609	60	75	0,8503	60	75	0,9532	60	75	0,8727	30	75	-0,9569	60			
SP87-365	75	-0,8603	30	75	0,9443	-60	75	0,9479	60	75	0,8139	60	75	0,9421	60	75	0,8581	30	75	-0,9434	60			
RB86 7515	75	-0,8455	30	75	0,9639	60	75	0,9669	60	75	0,8438	60	75	0,9606	60	75	0,8372	30	75	-0,9569	60			
RB92 8064	75	-0,8411	30	75	0,9432	60	75	0,9524	60	75	0,8541	60	75	0,9404	60	75	0,7824	30	75	-0,9521	60			
SP86-42	75	-0,8963	30	75	0,9507	60	75	0,9543	60	75	0,8450	60	75	0,9483	60	75	0,8944	30	75	-0,9461	60			
SP83-2847	75	-0,8769	30	75	0,9530	60	75	0,9565	60	75	0,8636	60	75	0,9511	60	75	0,8718	30	75	-0,9560	60			
Precoces	75	-0,8340	30	75	0,9122	30	75	0,9248	30	75	0,7808	30	75	0,9118	30	75	0,8228	30	75	-0,8919	30			
Médias	75	-0,7931	30	75	0,9241	60	75	0,9362	60	75	0,7275	60	75	0,9200	60	75	0,7724	30	75	-0,9190	60			
Tardias	75	-0,8453	30	75	0,9370	60	75	0,9507	60	75	0,8101	60	75	0,9345	60	75	0,8068	30	75	-0,9526	60			
Geral	75	-0,7957	30	75	0,9101	60	75	0,9265	60	75	0,7522	60	75	0,9067	60	75	0,7794	30	75	-0,9185	60			

valores de p significativos a 1%.

O excedente hídrico apresentou relação inversamente proporcional às variáveis Brix, Pol%cana, ATR, Pureza e Fibra, com os maiores valores de correlação ($r > 0,95$) observados entre excedente hídrico e as variáveis Brix, Pol%cana e ATR. As variáveis Fibra e Pureza apresentaram menores coeficientes de correlação, variando entre 0,80 a 0,91. As variáveis açúcares redutores e umidade de colmos apresentaram relação diretamente proporcional ao excedente hídrico, com os coeficientes de correlação variando de -0,89 a -0,95. Nesses casos houve variação nos períodos anteriores às amostragens a serem considerados para obtenção dos melhores ajustes com a maturação. No caso do déficit hídrico os melhores ajustes foram obtidos quando se considerou o déficit acumulado ao longo de 30 ou 60 dias antes das amostragens. Já para o excedente hídrico o período a ser considerado foi maior, acima de 90 dias, chegando a 150 dias para as cultivares mais tardias.

Tabela 47 - Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) obtidos entre o excedente hídrico acumulado em períodos anteriores às amostragens (T, em dias) e as variáveis tecnológicas analisadas durante a safra de 2003, em Piracicaba, SP. CAD é a capacidade de água disponível que gerou o melhor ajuste (mm)

Cultivares	Excedente hídrico																				
	AR			ATR			BRIX			FIBRA			Pol%Cana			PUREZA			UMIDADE		
	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T	CAD	r	T
SP91-1049	75	0,9129	90	75	-0,9580	150	75	-0,9581	150	75	-0,8325	150	75	-0,9569	150	75	-0,9117	90	75	0,9465	150
SP86-155	75	0,9120	90	75	-0,9507	150	75	-0,9514	150	75	-0,8182	150	75	-0,9506	150	75	-0,9073	90	75	0,9423	150
SP90-3414	75	0,9436	120	75	-0,9660	150	75	-0,9686	150	75	-0,8508	150	75	-0,9663	150	75	-0,9401	120	75	0,9500	150
SP87-365	75	0,8998	120	75	-0,9487	150	75	-0,9516	150	75	-0,8029	150	75	-0,9483	150	75	-0,8976	120	75	0,9388	150
RB86 7515	75	0,9107	120	75	-0,9545	150	75	-0,9619	150	75	-0,8324	150	75	-0,9500	150	75	-0,9085	120	75	0,9500	150
RB92 8064	75	0,9143	120	75	-0,9377	150	75	-0,9456	150	75	-0,8490	150	75	-0,9384	150	75	-0,8664	120	75	0,9453	150
SP86-42	75	0,9170	150	75	-0,9467	150	75	-0,9533	150	75	-0,8505	150	75	-0,9471	150	75	-0,9121	150	75	0,9492	150
SP83-2847	75	0,8927	150	75	-0,9385	150	75	-0,9459	150	75	-0,8448	150	75	-0,9356	150	75	-0,8851	150	75	0,9429	150
Precoces	75	0,9021	90	75	-0,9259	150	75	-0,9375	150	75	-0,7781	150	75	-0,9267	150	75	-0,8919	90	75	0,8865	150
Médias	75	0,8350	120	75	-0,9174	150	75	-0,9256	150	75	-0,7041	150	75	-0,9161	150	75	-0,8151	120	75	0,9069	150
Tardias	75	0,8778	120	75	-0,9174	150	75	-0,9271	150	75	-0,7743	150	75	-0,9183	150	75	-0,8399	120	75	0,9277	150
Geral	75	0,8406	150	75	-0,9080	150	75	-0,9206	150	75	-0,7309	150	75	-0,9072	150	75	-0,8252	150	75	0,9051	150

valores de p significativos a 1%.

Os resultados obtidos concordam com os obtidos por Humbert (1968), segundo o qual o processo de maturação fisiológica e acúmulo de sacarose nos colmos de cana-de-açúcar, em locais onde não há redução sazonal da temperatura do ar, é altamente dependente das condições hídricas locais. Este fator, bem como as baixas temperaturas e a deficiência nutricional, restringem a elongação do internódio, resultando no aumento do conteúdo de sacarose, devido à reduzida demanda de fotoassimilados nas regiões meristemáticas. Scarpari e Beauclair (2004) também relataram que uma seca superior a 130 mm nos meses que antecedem a colheita influenciam positivamente o acúmulo de sacarose no colmo. Robertson e Donaldson (1998) afirmam que quando o déficit hídrico ocorre próximo à colheita, a concentração de sacarose e o teor de matéria seca podem aumentar em até 15%, sendo o aumento médio de cerca de 8%.

4.5 Modelos descritivos da maturação da cana-de-açúcar

4.5.1 Seleção inicial das variáveis meteorológicas a serem utilizadas nos modelos

A partir dos resultados obtidos nas análises multivariadas e de correlação linear de Pearson entre as variáveis meteorológicas e oriundas da análise tecnológica da cana-de-açúcar, foram selecionadas aquelas consideradas mais importantes ao processo de maturação. Além da importância em relação ao processo de maturação, utilizou-se também o critério relacionado à facilidade na obtenção dos dados meteorológicos necessários e o número de estações disponíveis para tanto. A partir dessas premissas, foram selecionadas, inicialmente, as seguintes variáveis: temperatura do ar mínima, umidade relativa do ar mínima, precipitação, déficit hídrico e fotoperíodo. Para evitar efeitos de multicolineariedade entre as variáveis durante a modelagem, realizou-se matriz de correlação de Pearson entre as mesmas, de forma a realizar uma segunda etapa de seleção dessas variáveis (Tabela 48).

Tabela 48 - Valores de correlação linear de Pearson entre as variáveis selecionadas para elaboração dos modelos descritivos de maturação da cana-de-açúcar

	Precipitação	Tmin	Déficit Hídrico	UR% min	Fotoperíodo
Precipitação	1,0000	0,9114	-0,9316	0,9822	0,9890
Tmin	0,9114	1,0000	-0,9609	0,9806	0,9868
Déficit Hídrico	-0,9316	-0,9609	1,0000	-0,9796	-0,9284
UR% min	0,9822	0,9806	-0,9796	1,0000	0,9639
Fotoperíodo	0,9890	0,9868	-0,9284	0,9639	1,0000

valores de p significativos a 1%.

Os resultados indicam que há grande correlação entre todas as variáveis selecionadas, não sendo recomendado, portanto, a utilização das mesmas conjuntamente. Assim sendo, decidiu-se realizar a modelagem com a variável precipitação, pois se trata de um dos mais citados agentes de maturação da cana-de-açúcar, além do fato de ser a variável meteorológica de mais simples obtenção e com maior densidade de observação nas unidades produtoras de cana-de-açúcar. Além disso, realizou-se uma avaliação preliminar de possíveis modelos que se ajustariam melhor ao fenômeno descrito. Para tanto, realizou-se teste de normalidade nas variáveis tecnológicas (Pol%cana, Brix, ATR, fibra e umidade) e de precipitação

acumulada selecionadas para modelagem. Contudo, embora tenha sido detectada normalidade nos dados (teste de Anderson-Darling, $p > 0,05$), optou-se por um ajuste exponencial para os modelos a serem realizados. Modelos lineares também foram avaliados, mas embora tenham apresentado ótimos ajustes, foram considerados inadequados para representar o processo de acúmulo de sacarose, com tendência a gerar valores extremos no início e final de safra. Em todos os casos, os modelos foram gerados considerando-se a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostras tecnológicas, visto que este foi o período que propiciou os maiores valores de R^2 ajustado e melhor distribuição dos resíduos, como será comprovado com os resultados apresentados a seguir.

4.5.2 Modelos para cultivares de ciclo precoce baseados em precipitação

O modelo de variação do ATR em função da precipitação acumulada é apresentado na Figura 36. O modelo apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,92 ($p < 0,01$) e ausência de valores que extrapolassem um intervalo de confiança de 95%. Scarpari e Beauclair (2009) propuseram modelos lineares multivariados para previsão dos valores de ATR e encontrou valor de coeficiente de determinação igual a 0,48 para uma cultivar precoce (SP80-1842).

A distribuição e normalidade dos resíduos do modelo de ATR para cultivares precoces são apresentadas na Figura 37 (A e B). Como pode ser observado, houve baixa dispersão dos resíduos em relação aos valores preditos, com os mesmos oscilando entre valores próximos ao intervalo de 1 a -1 (ausência de *outliers*). Não foram observadas tendências de aumento ou diminuição nos valores dos resíduos em função dos valores preditos de ATR, descartando eventuais problemas com heterocedasticidade das variâncias dos mesmos. Além disso, observou-se média nula e normalidade dos resíduos (Figura 37B), com $p > 0,05$ (teste de Anderson-Darling).

Figura 36 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre açúcar total recuperável (ATR) de cultivares precoces e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,92; $p < 0,01$)

Figura 37 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de ATR para cultivares precoces de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa dos valores de Brix em função da precipitação é apresentado na Figura 38 e resultou em um R^2 ajustado igual a 0,9228 ($p < 0,01$). A distribuição dos resíduos (Figura 39A) indicou baixa dispersão em relação aos valores preditos (ausência de *outliers*) e ausência de tendências de aumento ou diminuição nos valores dos resíduos em função dos valores preditos. Os resíduos apresentaram

distribuição normal (Figura 39B), com média nula e valor de $p > 0,05$ (teste de Anderson-Darling).

Figura 38 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Brix de cultivares precoces de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9228; $p < 0,01$)

Figura 39 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Brix para cultivares precoces de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa dos valores de Pol%cana é apresentado na Figura 40, onde se observa a relação inversa dessa variável com a chuva acumulada nos últimos 120 dias antes da amostragem. Essa relação resultou em um R^2 ajustado de 0,9240

($p < 0,01$). A distribuição dos resíduos (Figura 41A) indicou ausência de heterocedasticidade irregular e baixa dispersão dos resíduos em relação aos valores preditos (ausência de *outliers*), com os mesmos oscilando entre valores próximos ao intervalo de 1 a -1. Os resíduos apresentaram distribuição normal (Figura 41B), com média nula e valor de $p > 0,05$ (teste de Anderson-Darling).

Figura 40 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Pol%cana de cultivares precoces de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9240; $p < 0,01$)

Figura 41 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Pol%cana para cultivares precoces de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa da fibra (Figura 42) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,4758 ($p < 0,01$), o menor valor obtido entre todos os modelos avaliados. A distribuição dos resíduos (Figura 43A) indicou tendência dos resíduos aumentarem com o aumento dos valores de fibra preditos (heterocedasticidade irregular). Além disso, os resíduos não apresentaram distribuição normal (Figura 43B), com média maior que zero e valor de $p < 0,05$ (teste de Anderson-Darling).

Figura 42 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Fibra de cultivares precoces de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,4758; $p < 0,01$)

Figura 43 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Fibra para cultivares precoces de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa da umidade em função da precipitação (Figura 42) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,9034 ($p < 0,01$). A distribuição dos resíduos (Figura 41A) indicou ausência de heterocedasticidade irregular e baixa dispersão dos resíduos em relação aos valores preditos (ausência de *outliers*). Além disso, os resíduos apresentaram distribuição normal (Figura 41B), com média nula e valor de $p > 0,05$ (teste de Anderson-Darling).

Figura 44 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre umidade de cultivares precoces de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9034; $p < 0,01$)

Figura 45 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de umidade para cultivares precoces de cana-de-açúcar

4.5.3 Modelos para cultivares de ciclo médio baseados em precipitação

O modelo de variação do ATR em função da precipitação acumulada (Figura 46) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,9531 ($p < 0,01$) e ausência de valores além do intervalo de confiança de 95%. Scarpari (2009) propôs modelo para previsão de ATR de uma cultivar média (SP81-3250) e encontrou valor de R^2 bem inferior ($= 0,32$).

Figura 46 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre ATR de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9531; $p < 0,01$)

A distribuição e normalidade dos resíduos do modelo de ATR para cultivares precoces são apresentadas na Figura 47 (A e B). Como pode ser observado, houve baixa dispersão dos resíduos em relação aos valores preditos (ausência de *outliers*). Não foram observadas tendências de aumento ou diminuição nos valores dos resíduos em função dos valores preditos de ATR, descartando eventuais efeitos de heterocedasticidade dos resíduos. Além disso, observou-se média nula e normalidade dos resíduos (Figura 47B), com $p > 0,05$ (teste de Anderson-Darling).

Figura 47 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de ATR para cultivares médias de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa da umidade em função da precipitação (Figura 48) apresentou valor de R^2 ajustado de 0,9544 ($p < 0,01$). A distribuição dos resíduos (Figura 49A) indicou ausência de heterocedasticidade irregular e baixa dispersão dos resíduos em relação aos valores preditos. Além disso, os resíduos apresentaram distribuição normal (Figura 49B), com média nula e valor de $p > 0,05$.

Figura 48 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Brix de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9544; $p < 0,01$)

Figura 49 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Brix para cultivares médias de cana de açúcar

O modelo para estimativa da Pol%cana em função da precipitação (Figura 50) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,9519 ($p < 0,01$). A distribuição dos resíduos (Figura 51A) indicou ausência de heterocedasticidade irregular e baixa dispersão dos resíduos em relação aos valores preditos. Além disso, os resíduos apresentaram distribuição normal (Figura 51B), com média nula e valor de $p > 0,05$.

Figura 50 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Pol%cana de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9519; $p < 0,01$)

Figura 51 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Pol%cana para cultivares médias de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa da fibra em função da precipitação (Figura 52) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,6701 ($p < 0,01$). De forma semelhante ao ocorrido com o modelo proposto para as cultivares precoces, o modelo de fibra apresentou o menor valor de R^2 entre todos os modelos avaliados para cultivares médias.

Figura 52 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre fibra de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,6701; $p < 0,01$)

A distribuição dos resíduos (Figura 53A) indicou tendência de aumento nos erros em função do aumento dos valores de fibra, o que resultou em heterocedasticidade irregular. Além disso, os resíduos não apresentaram distribuição normal (Figura 53B), o que também indica a maior dispersão dos valores estimados em relação aos observados. Esses resultados podem ser atribuídos ao fato do teor de fibra ser intensamente influenciado pelas características dos genótipos, embora apresente interações com as condições meteorológicas locais (FERNANDES, 2003).

Figura 53 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Fibra para cultivares médias de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa da umidade em função da precipitação (Figura 54) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,8857 ($p < 0,01$). Esse comportamento pode ser atribuído ao fato do cálculo da umidade envolver o uso da variável fibra, a qual apresentou as menores correlações com variáveis meteorológicas, reforçando a afirmação de Stupiello (2002) de que a fibra é intensamente influenciada pelo genótipo. A distribuição dos resíduos (Figura 55A) indicou ausência de heterocedasticidade irregular e baixa dispersão dos resíduos em relação aos valores preditos (ausência de *outliers*). Além disso, os resíduos apresentaram distribuição normal (Figura 55B), com média nula e valores de $p > 0,05$ (teste de Anderson-Darling).

Figura 54 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre umidade de cultivares médias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,8857; $p < 0,01$)

Figura 55 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de umidade para cultivares médias de cana-de-açúcar

4.5.4 Modelos para cultivares de ciclo tardio baseados em precipitação

O modelo de variação do ATR em função da precipitação acumulada para cultivares tardias é apresentado na Figura 56. O modelo apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,9531 ($p < 0,01$) e ausência de valores além do intervalo de confiança de 95%. Scarpari (2009) propôs modelos lineares multivariados para previsão dos

valores de ATR e encontrou valor de coeficiente de determinação igual a 0,26 para uma cultivar tardia (RB72454).

Figura 56 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre ATR de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9531; $p < 0,01$)

Como pode ser observado, houve baixa dispersão dos resíduos em relação aos valores preditos (Figura 57A), com os mesmos oscilando entre valores próximos ao intervalo de 1 a -1 (ausência de *outliers*). Não foram observadas tendências de aumento ou diminuição nos valores dos resíduos em função dos valores preditos de ATR, descartando eventuais problemas com heterocedasticidade das variâncias dos mesmos. Além disso, observou-se média nula e normalidade dos resíduos (Figura 57B), com $p > 0,05$.

Figura 57 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de ATR para cultivares tardias de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa de valores de Brix em função da precipitação (Figura 58) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,9439 ($p < 0,01$). A distribuição dos resíduos (Figura 59A) indicou ausência de heterocedasticidade irregular e baixa dispersão dos resíduos (ausência de *outliers*). Além disso, os resíduos apresentaram distribuição normal (Figura 59B), com média nula e valor de $p > 0,05$.

Figura 58 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Brix de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9439; $p < 0,01$)

Figura 59 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de brix para cultivares tardias de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa da Pol%cana em função da precipitação (Figura 60) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,9470 ($p < 0,01$). A distribuição dos resíduos (Figura 61A) indicou ausência de heterocedasticidade irregular e baixa dispersão dos resíduos (ausência de *outliers*). Além disso, os resíduos apresentaram distribuição normal (Figura 61B), com média nula e valor de $p > 0,05$.

Figura 60 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre Pol%cana de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,9470; $p < 0,01$)

Figura 61 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de Pol%cana para cultivares tardias de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa da fibra em função da precipitação (Figura 62) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,61 ($p < 0,01$), o menor valor entre todos os modelos avaliados. A distribuição dos resíduos (Figura 63A) indicou tendência de aumento nos erros em função do aumento dos valores de fibra (heterocedasticidade irregular). Além disso, os resíduos não apresentaram distribuição normal (Figura 63B), com média maior que zero e valor de $p < 0,05$.

Figura 62 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre fibra de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,61; $p < 0,01$)

Figura 63 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de fibra para cultivares tardias de cana-de-açúcar

O modelo para estimativa da umidade em função da precipitação (Figura 64) apresentou valor de R^2 ajustado igual a 0,8664 ($p < 0,01$). A distribuição dos resíduos (Figura 65A) indicou ausência de heterocedasticidade irregular e baixa dispersão dos resíduos em relação aos valores preditos (ausência de *outliers*). Além disso, os resíduos apresentaram distribuição normal (Figura 65B), com média nula e $p > 0,05$.

Figura 64 - Regressão não linear (ajuste exponencial) entre umidade de cultivares tardias de cana-de-açúcar e a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostragens (R^2 ajustado = 0,8664; $p < 0,01$)

Figura 65 - Distribuição (A) e normalidade dos resíduos (B) gerados a partir do modelo de umidade para cultivares tardias de cana-de-açúcar

4.6 Avaliação dos modelos descritivos com dados independentes

4.6.1 Modelos para estimativa de valores de ATR

Na Figura 66 são apresentadas as relações entre valores observados nas regiões de Capivari e Jaú (SP) e valores estimados pelos modelos propostos para a variável ATR. Em todos os casos, os valores de R^2 ajustado obtidos a partir das relações entre valores observados e estimados foram acima de 0,98 ($p < 0,01$) indicando que os modelos foram capazes de reproduzir os dados reais com precisão, mesmo quando aplicados em outras condições climáticas. Como se pode observar na Tabela 49, os valores de índice D foram superiores a 0,98 em todos os casos, o que indica que os modelos conseguem produzir os valores observados com exatidão. Todos os modelos avaliados para a variável ATR apresentaram valores de índice C acima de 0,98, desempenho considerado "ótimo" segundo classificação proposta por Camargo e Sentelhas (1997).

Analisando-se a Figura 66 e a Tabela 49 é possível identificar padrões diferenciados nas respostas do modelo em função da região analisada. Os valores estimados para a região de Capivari foram superestimados em relação aos valores reais obtidos, enquanto os valores estimados para Jaú subestimaram os valores observados. Essa tendência é confirmada quando se analisa os valores dos erros médios. Em Capivari os valores dos erros médios foram negativos em todos os casos

avaliados (precoces, médios e tardios), confirmando que os modelos superestimaram os valores reais.

Figura 66 - Relação entre os valores de ATR observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Reta contínua apresenta proporção 1:1, com $a=0$ e $b=1$

Enquanto isso, os valores observados em Jaú foram positivos, indicando que, nesse caso, os modelos subestimaram os valores reais. Embora esse padrão esteja fortemente relacionado às condições climáticas vigentes no ano do experimento, pode-se sugerir que o fato dos padrões climáticos locais serem ligeiramente diferente dos observados em Piracicaba levaram a resultados diferenciados dos modelos. Em todos

os casos, o coeficiente angular das equações propostas foi próximo a um, o que implica em um erro sistemático absoluto, ou seja, que praticamente não varia ao longo da série. Nesse sentido, os valores dos erros médios foram iguais aos erros médios absolutos, praticamente para todos os modelos avaliados, o que confirma a ocorrência de erro sistemático absoluto. Devido a essa característica do modelo há possibilidade de calibrar localmente os modelos de forma a que os valores estimados coincidam com os observados na linha 1:1.

Tabela 49 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros (kg.t^{-1}) relacionados à estimativa de valores de ATR pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP

Modelo	Local	b	R^2	D	C	EM	EMA
Precoce	Capivari	1,0001	0,9930	0,9872	0,9843	4,3549	4,3549
	Jaú	1,0159	0,9854	0,9910	0,9848	-3,8594	4,1303
Média	Capivari	0,9944	0,9916	0,9888	0,9852	5,8468	5,8468
	Jaú	0,9913	0,9875	0,9877	0,9824	-5,9722	5,9722
Tardia	Capivari	1,0028	0,9900	0,9927	0,9884	4,1321	4,1321
	Jaú	1,0040	0,9961	0,9931	0,9915	-4,9639	4,9639

4.6.2 Modelos para estimativa de valores de Brix

Na Figura 67 são apresentadas as relações entre os valores observados e os estimados de Brix, nas regiões de Capivari e Jaú (SP), com o uso dos modelos baseados na precipitação acumulada. Em todos os casos, os valores de R^2 ajustado obtidos a partir das relações entre valores observados e estimados foram superiores de 0,97 ($p < 0,01$) indicando que os modelos foram capazes de reproduzir os dados reais com precisão. Como pode ser observado na Tabela 50, os valores de índice D foram superiores a 0,94 em todos os casos, o que indica que os modelos conseguem produzir valores estimados com exatidão embora o valor seja ligeiramente menor do que o observado no caso do modelo de ATR. Todos os modelos avaliados apresentaram valores de índice C acima de 0,93, desempenho considerado “ótimo”.

Figura 67 - Relação entre os valores de Brix observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Reta contínua apresenta proporção 1:1, com $a=0$ e $b=1$

Analisando-se a Figura 67 e a Tabela 50 é possível identificar os padrões diferenciados nas respostas dos modelos em função da região analisada, assim como observado no caso dos modelos de ATR. Dessa forma, os valores estimados de Brix para a região de Capivari foram superestimados em relação aos valores reais obtidos, enquanto os valores estimados para Jaú subestimaram os valores observados. Essa tendência também é confirmada quando se analisa os valores dos erros médios, visto que em Capivari os valores dos erros médios foram negativos em todos os casos

avaliados (os modelos superestimaram os valores reais), enquanto em Jaú os erros foram positivos, (modelos subestimaram os valores reais). Deve-se destacar ainda que os valores dos coeficientes angulares das equações propostas foram próximos a um e os erros médios absolutos idênticos aos erros médios. Esses fatos implicam em erros sistemáticos absolutos, o que facilita um ajuste empírico do modelo para diferentes condições.

Tabela 50 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros ($^{\circ}$ Brix) relacionados à estimativa de valores de Brix pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP

Modelo	Local	b	R^2	D	C	EM	EMA
Precoce	Capivari	0,9884	0,9859	0,9816	0,9756	0,6809	0,681
	Jaú	1,0012	0,9933	0,9821	0,9793	-0,8180	0,818
Média	Capivari	1,0008	0,9889	0,9789	0,9743	0,9804	0,980
	Jaú	1,0080	0,9639	0,9453	0,9305	-0,9975	0,9975
Tardia	Capivari	1,0060	0,9777	0,9546	0,9454	0,9375	0,9375
	Jaú	1,0042	0,9867	0,9772	0,9716	-1,0880	1,088

4.6.3 Modelos para estimativa de valores de Pol%cana

Na Figura 68 são apresentadas as relações entre valores observados e estimados de Pol%cana para as regiões de Capivari e Jaú (SP). Em todos os casos, os valores de R^2 ajustado obtidos foram maiores do que 0,96 ($p < 0,01$), indicando que os modelos foram capazes de reproduzir os dados reais com precisão. Como pode ser observado na Tabela 51, os valores de índice D foram superiores a 0,95 em todos os casos, o que indica que os modelos conseguem produzir valores estimados com exatidão. Todos os modelos avaliados apresentaram valores de índice C acima de 0,93, desempenho considerado “ótimo”.

Figura 68 - Relação entre os valores de Pol%cana observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Reta contínua apresenta proporção 1:1, com a=0 e b=1

Analisando-se a Figura 68 e a Tabela 51 observa-se os mesmos padrões nas respostas dos modelos em função da região já observados no caso das variáveis anteriormente analisadas. Os valores estimados de Pol%cana foram superestimados em relação aos valores reais obtidos na região de Capivari, enquanto em Jaú os valores reais foram subestimados pelos modelos. Esse padrão também foi confirmado pelos valores dos erros médios, visto que em Capivari os valores dos erros médios foram negativos em todos os casos avaliados (os modelos superestimaram os valores reais),

enquanto em Jaú os erros foram positivos, (modelos subestimaram os valores reais). Além disso, deve-se destacar que os valores dos coeficientes angulares das equações propostas foram próximos de um e os erros médios absolutos idênticos aos erros médios, resultado idêntico ao observado nos modelos de variáveis anteriormente analisadas. Assim sendo, o padrão encontrado caracteriza erros sistemáticos absolutos, o que permite futuros ajustes a serem realizados nos modelos em função da região analisada.

Tabela 51 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros (%) relacionados à estimativa de valores de Pol%cana pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP

Modelo	Local	b	R^2	D	C	EM	EMA
Precoce	Capivari	1,0205	0,9721	0,9680	0,9564	0,9187	0,9187
	Jaú	1,0028	0,9954	0,9874	0,9855	-0,8364	0,8364
Média	Capivari	1,0195	0,9797	0,9554	0,9470	0,9188	0,9188
	Jaú	1,0064	0,9926	0,9852	0,9820	-0,9622	0,9622
Tardia	Capivari	1,0101	0,9755	0,9507	0,9406	0,9224	0,9224
	Jaú	1,0134	0,9826	0,9827	0,9754	-0,9755	0,9755

4.6.4 Modelos para estimativa de valores de Fibra

Na Figura 69 são apresentadas as relações entre os valores observados e os estimados pelos modelos de fibra, nas regiões de Capivari e Jaú (SP). Em todos os casos, os valores de R^2 ajustado foram maiores que 0,80 ($p < 0,01$), indicando que os modelos foram capazes de reproduzir os dados reais com precisão. Como pode ser observado na Tabela 52, os valores de índice D foram superiores a 0,88 em todos os modelos avaliados, o que indica que os mesmos conseguem produzir valores estimados com média exatidão, já que esses valores são menores do que os observados para as variáveis ATR, Brix e Pol%cana. Todos os modelos avaliados para a variável fibra apresentaram valores de índice C acima de 0,79, desempenho considerado “muito bom”.

Figura 69 - Relação entre os valores de Fibra observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Reta contínua apresenta proporção 1:1, com $a=0$ e $b=1$

Na Figura 69 e a Tabela 52 é possível observar que os padrões observados nos resultados dos modelos anteriores não se mantiveram no caso da variável fibra. Nesse caso, os resultados foram muito similares entre todos os modelos propostos (precoces, médias e tardias) e em ambas as regiões analisadas (Capivari e Jaú). Os valores estimados tenderam a subestimar os valores reais no caso de menores teores de fibra (9 a 10%) e a superestimar valores maiores (acima de 11%). Essa tendência também pode ser observada nos EMs e EMAs, além do fato dos coeficientes angulares das

equações propostas serem superiores a 1. Diante disso, caracteriza-se a ocorrência de erros sistemáticos percentuais, ou seja, que variam ao longo da série de dados, com o valor do erro aumentando em condições maiores de fibra.

Tabela 52 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros (%) relacionados à estimativa de valores de Fibra pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP

Modelo	Local	b	R^2	D	C	EM	EMA
Precoce	Capivari	1,36583	0,93886	0,95824	0,93280	-0,0298	0,28965
	Jaú	1,25900	0,83864	0,93871	0,87138	-0,0783	0,48123
Média	Capivari	1,29609	0,89110	0,95226	0,90672	0,0127	0,32307
	Jaú	1,34622	0,80686	0,91816	0,83873	-0,0221	0,51575
Tardia	Capivari	1,32872	0,78455	0,88450	0,79866	0,3127	0,47345
	Jaú	1,64202	0,85089	0,88996	0,83115	0,0563	0,64827

4.6.5 Modelos para estimativa de valores de umidade

Na Figura 70 são apresentadas as relações entre os valores observados e os estimados pelos modelos de umidade dos colmos da cana-de-açúcar, nas regiões de Capivari e Jaú (SP). Em todos os casos, os valores de R^2 ajustado foram superiores a 0,96 ($p < 0,01$) indicando que os modelos foram capazes de reproduzir os dados reais com precisão. Como pode ser observado na Tabela 53, os valores de índice D foram superiores a 0,92 em todos os casos, o que indica que os modelos conseguem produzir valores estimados com exatidão. Todos os modelos avaliados apresentaram valores de índice C acima de 0,90, desempenho considerado “ótimo” (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). Analisando-se a Figura 70 e a Tabela 53 nota-se a ocorrência de padrões similares aos já comentados para as variáveis, ATR, Brix e Pol%cana. Dessa forma, os modelos geraram valores de umidade subestimados em Capivari e superestimados em Jaú. Os valores dos erros médios confirmam os padrões acima descritos, pois em Capivari seus valores foram negativos em todos os casos avaliados (os modelos subestimaram os valores reais), enquanto em Jaú os valores foram positivos (modelos

superestimaram os valores reais). Mais uma vez, os valores dos coeficientes angulares das equações propostas foram próximos de um e os erros médios absolutos idênticos aos erros médios, com exceção do modelo precoce avaliado em Jaú, onde o coeficiente angular foi igual a 1,19 e os erros (médio e absoluto) diferentes.

Figura 70 - Relação entre os valores de umidade observados e estimados pelos modelos propostos para as cultivares precoces, médias e tardias, na região de Capivari e Jaú (SP). Retta contínua apresenta proporção 1:1, com $a=0$ e $b=1$

Tabela 53 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros relacionados à estimativa de valores de umidade pelos modelos de cultivares precoces, médias e tardias nas localidades de Capivari e Jaú, SP

Modelo	Local	b	R^2	D	C	EM	EMA
Precoce	Capivari	0,9953	0,9638	0,9640	0,9489	-1,2424	1,2424
	Jaú	1,1959	0,9668	0,9735	0,9596	0,8199	1,0259
Média	Capivari	0,9847	0,9706	0,9530	0,9409	-1,5321	1,5321
	Jaú	1,0351	0,9806	0,9743	0,9662	1,2976	1,2976
Tardia	Capivari	0,9661	0,9550	0,9217	0,9037	-1,9707	1,9707
	Jaú	1,2047	0,9743	0,9720	0,9612	1,0756	1,3490

4.6.6 Considerações gerais acerca dos modelos avaliados

Os modelos avaliados mostraram-se aptos a descrever o processo de maturação pela relação estabelecida com a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores a cada amostragem tecnológica realizada. Além disso, o uso de um ajuste exponencial permitiu descrever de maneira mais adequada a maturação da cana-de-açúcar do que um modelo linear também avaliado por esse trabalho e proposto por outros autores (SCARPARI, 2002). Essa condição pode ser relacionada ao fato de que o teor aparente de sacarose não é resultado apenas do aumento na síntese desse açúcar com a maturação, mas também do processo de desidratação dos tecidos, que aumentam intensamente no meio da safra, o qual altera as relações entre as variáveis consideradas para avaliar a maturidade dos canaviais, visto que muitas delas são expressas em percentagem. Além disso, outro fator que deve ser considerado é a dificuldade na extração da sacarose, a qual varia ao longo da safra, tornando-se mais difícil nos momentos de maior déficit hídrico acumulado e, portanto, de menor umidade nos colmos.

O grande destaque dos modelos aqui avaliados, além de sua precisão e exatidão ao estimar os valores das variáveis relacionadas à maturação da cana-de-açúcar é a uniformidade da variabilidade de seus resíduos. Além disso, os modelos apresentaram precisão, exatidão e pequenos erros, quando se comparou valores estimados e observados em condições independentes. Marin et al. (2011), utilizando o modelo

DSSAT/CANEGRO, encontrou baixa habilidade preditiva do modelo para teor de sacarose em relação às outras variáveis, com valores de r^2 variando de 0,52 a 0,66 para as cultivares RB72454 e SP83-2847, respectivamente. Segundo o autor, essa condição foi devida, em parte, ao fato de suas amostragens terem se concentrado ao final da safra. Contudo, salienta que a determinação da maturação ainda é uma dificuldade, fato também ressaltado por Inman-Bamber et al. (2009), o qual atribui essa condição ao conhecimento insuficiente que se tem desse processo na planta como um todo. Nesse sentido, o presente trabalho buscou destacar as interações da matéria-prima com o clima e ressaltar a importância da compressão do processo de produção do setor canavieiro para adequação dos modelos. Além das condições fisiológicas da planta e sua interação com o clima local, há uma série de variáveis que devem ser consideradas para obtenção de resultados mais adequados em termos de previsão da qualidade da matéria-prima. Tais condições são discutidas a seguir, na apresentação dos resultados dos modelos em escala operacional.

Finalmente, deve-se salientar a ocorrência dos padrões diferenciados nos modelos quando utilizados nas regiões de Capivari e Jaú. Uma possível explicação para essa situação poderia ser a diferença nas condições meteorológicas dessas regiões em relação àquela em que o modelo foi desenvolvido. Como pode ser observado na Figura 71, houve nítida diferença na temperatura mínima do ar entre o local onde foram obtidos os dados utilizados na geração do modelo (Piracicaba) e os locais onde o mesmo foi avaliado (Capivari e Jaú). Em Piracicaba a temperatura mínima do ar permaneceu em condição intermediária à Capivari (abaixo) e Jaú (acima). Como a temperatura mínima do ar é uma das variáveis que interfere na maturação da cana-de-açúcar (embora com menor intensidade que as condições hídricas), pode-se inferir que em Capivari houve um fator adicional à maturação, enquanto em Jaú essa condição foi menos intensa do que no próprio local de origem dos dados (Piracicaba). Todavia, esse padrão é incoerente com os resultados obtidos pelos modelos. Em Capivari houve uma tendência do modelo a superestimar os valores de ATR, enquanto em Jaú a tendência foi de subestimativa. Caso o efeito da temperatura mínima do ar fosse presente, o esperado seria um efeito de subestimativa do ATR em Capivari e superestimativa em Jaú.

Figura 71 - Variação mensal da temperatura mínima do ar durante o ano de 2002 nas regiões de Capivari, Jaú e Piracicaba, SP. Fonte: IAC e ESALQ/USP

Contudo, outros processos podem estar envolvidos. Condições de armazenamento hídrico dos solos locais e interações locais não esperadas podem ter influenciado os resultados. Além disso, as amostragens e análises laboratoriais, embora padronizadas, foram realizadas por equipes e em laboratórios diferentes (das próprias unidades) o que pode ter levado a algum erro não esperado.

4.7 Aplicações do modelo em escala operacional: extrapolações para diferentes safras e regiões

Nas Figuras 72 a 77 são apresentados os valores observados e os estimados pelos modelos propostos para a variável ATR em diferentes regiões do estado de São Paulo durante as safras de 2005/06 a 2010/11. Embora haja diferença entre os valores medidos e estimados, nota-se que os modelos foram capazes de captar as variações nos valores de ATR ao longo dos meses de safra (abril a novembro) em diferentes regiões e anos. Essa informação é extremamente importante para o uso dos modelos em condições diferentes daquelas onde foram gerados os dados que levaram a sua composição, visto que a “aplicabilidade” de modelos empíricos nessas condições é frequentemente questionada. Além disso, os erros encontrados foram, na maioria dos casos, inferiores a 10%, sem que tenha havido qualquer ajuste nos modelos em função do local ou ano de análise. Embora seja difícil avaliar quais as causas e o peso de cada uma nas diferenças observadas entre os valores medidos e estimados, alguns aspectos devem ser considerados tais como:

- 1) Cultivares: em alguns momentos das safras (especialmente início e final) há predomínio de poucas cultivares no “mix” de moagem das unidades, de tal forma que as características das mesmas (mais “ricas” ou mais “pobres” que a média) pode predominar sobre as demais levando a desvios entre os valores estimados e medidos;
- 2) Colheita mecanizada: os efeitos da colheita mecanizada são marcantes, especialmente pelo aumento das impurezas minerais e vegetais, fatores que podem levar à redução dos valores medidos de ATR em relação aos estimados pelo modelo;
- 3) Uso de maturadores: o modelo não considera os efeitos do uso de maturadores e, assim sendo, os valores observados no início de safra podem ser maiores que os estimados;
- 4) Ocorrência de pragas e/ou doenças: os efeitos de pragas e doenças não são considerados pelo modelo, fato que pode levar a desvios dependentes da extensão e intensidade do ataque;

- 5) Representatividade dos registros de precipitação: dada a variabilidade espacial da precipitação, quanto mais representativos e numerosos os registros, maior o desempenho dos modelos, especialmente nas épocas de maior precipitação (início e final de safra).

Figura 72 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Piracicaba, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11

Figura 73 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Jaú, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11

Figura 74 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Jaboticabal, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11

Figura 75 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Ourinhos, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11

Figura 76 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Araçatuba, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11

Figura 77 - Valores observados e estimados de ATR pelos modelos propostos em Igarapava, SP, durante as safras de 2005/06 a 2010/11

Na Figura 78 são apresentadas as relações entre os valores observados e os estimados de ATR nas diferentes regiões avaliadas. Houve variação nos valores de R^2 ajustado de acordo com a região analisada, com menor valor observado na região de

Ourinhos ($R^2_{\text{ajust}} = 0,66$; $p < 0,01$). Nas demais regiões os valores de R^2 ajustado foram superiores a 0,79, chegando, no caso de Jaboticabal, a 0,96 ($p < 0,01$). Como pode ser observado na Tabela 54, os valores de índice D foram superiores a 0,89 em todos os locais considerados, o que indica que os mesmos foram capazes de estimar os valores de ATR com precisão. Houve variação no desempenho pelo índice de C, com valores considerados “bons” (Ourinhos), “muito bons” (Piracicaba e Jaú) e “ótimos” (Jaboticabal, Araçatuba e Igarapava).

Os valores de coeficiente angular dos ajustes entre os valores observados e os estimados foram, em todos os locais considerados, muito próximos a um, o que sugere erros sistemáticos absolutos. Porém, quando se observa os erros médios e erros médios absolutos, observa-se grande diferença entre os mesmos em todos os locais avaliados. Em Piracicaba, a relação entre dados observados e estimados esteve muito próxima a reta 1:1 com pequena tendência de subestimativa do ATR ao final da safra. A subestimativa do ATR também foi observada na região de Jaú, de forma praticamente constante durante os diferentes momentos da safra. Nas regiões de Jaboticabal e Ourinhos observou-se a tendência do modelo superestimar os dados de início de safra e subestimar os valores observados ao final da mesma. Padrão oposto foi observado em Igarapava e Araçatuba, onde o modelo apresentou tendência a subestimar os dados de início de safra e superestimar, em menor escala, os valores de ATR do final da safra.

Além disso, deve-se ressaltar os baixos valores de erro médio absoluto (%) o qual foi de, no máximo, 4% nas regiões de Ourinhos e Jaú. Nas demais regiões os erros foram inferiores a 3,7%, com valor mínimo encontrado em Piracicaba (2,5%). Esse fato demonstra a viabilidade do uso dos modelos propostos para outras regiões além do local para o qual foi inicialmente desenvolvido, principalmente quando se considera a dificuldade de se comparar os dados estimados aos dados reais de safra, os quais estão expostos a inúmeras outras variáveis operacionais não abrangidas pelo modelo, como o uso de maturadores, a presença de impurezas minerais e vegetais, além dos possíveis erros laboratoriais, entre outros.

Figura 78 - Relação entre a ATR observada e estimada pelo modelo pluviométrico para as regiões de Piracicaba, Jaú, Jaboticabal, Ourinhos, Araçatuba e Igarapava, São Paulo, durante as safras de 2005/06 a 2010/11

Tabela 54 - Análise de regressão, coeficientes R^2 ajustado, índice de Willmott (D), índice de confiança de Camargo (C) e erros (kg ATR.t⁻¹; %) relacionados à estimativa de valores de ATR pelo modelo pluviométrico para as regiões de Piracicaba, Jaú, Jaboticabal, Ourinhos, Araçatuba e Igarapava, São Paulo, durante as safras de 2005/06 a 2010/11

Local	b	R^2	D	C	EM	EMA	EMA (%)
Piracicaba	0,9559	0,7910	0,9420	0,8402	-0,1876	3,4689	2,5%
Jaú	1,0677	0,7731	0,9162	0,8081	-2,6251	5,3354	4,0%
Jaboticabal	1,0138	0,9657	0,9912	0,9744	-0,4649	4,8490	3,7%
Ourinhos	0,8170	0,6609	0,8993	0,7350	1,0423	5,3269	4,0%
Araçatuba	1,1810	0,8901	0,9588	0,9058	-0,6104	4,4635	3,3%
Igarapava	1,0862	0,9361	0,9776	0,9466	-1,7481	4,0175	3,0%

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- 1) O efeito da época de plantio sobre a maturação da cana-de-açúcar é considerável apenas no início de safra, sugerindo que os efeitos das condições ambientais (aumento do déficit hídrico, por exemplo) são mais importantes para a maturação;
- 2) A variação na disponibilidade hídrica está diretamente relacionada ao incremento das variáveis que indicam a qualidade do caldo da cana-de-açúcar. Além disso, as características das cultivares são importantes, principalmente, no início de safra quando há grande diferença entre as mesmas. Contudo, a partir de agosto essas diferenças praticamente inexistem, dado o efeito do clima sobre as mesmas;
- 3) A análise de agrupamento por método hierárquico permitiu a identificação de grupos de maturação de cultivares de cana-de-açúcar de forma multivariada, ou seja, considerando todas as variáveis relacionadas à maturação e, portanto, de forma muito mais completa que os métodos tradicionais (univariados);
- 4) A fibra é uma variável que tem pouca influência na formação de grupos de maturação, sendo uma característica dependente mais do genótipo do que do clima;
- 5) As diferenças entre os grupos formados (significativas até maio) tornam-se aparentemente inexistentes em agosto-setembro, porém as cultivares mais “ricas” mantiveram-se assim ao longo de toda a safra, indicando que o potencial genético das cultivares têm grande importância na magnitude de sua resposta ao clima local, em termos de acúmulo de sacarose;
- 6) As análises de componentes principais possibilitaram visualizar as interações entre cultivares, variáveis meteorológicas e época de colheita nos processos de desenvolvimento vegetativo e maturação;
- 7) A relação entre as variáveis relacionadas à maturação e as condições meteorológicas é evidente, propiciando elevadas correlações, com destaque

para a precipitação e a temperatura do ar. Além disso, o efeito é cumulativo, devendo-se observar as condições meteorológicas ocorridas em, pelo menos, 120 dias antes das amostragens tecnológicas;

- 8) As variáveis meteorológicas apresentaram grande correlação entre si, de tal forma que apenas a precipitação foi suficiente para explicar a variabilidade da maturação. Além disso, a facilidade de obtenção de dados de precipitação dá maior flexibilidade ao modelo, permitindo seu uso para diferentes regiões e/ou microrregiões (unidades produtoras, fazendas etc.);
- 9) Em todos os casos, os modelos foram gerados considerando-se a precipitação acumulada nos 120 dias anteriores às amostras tecnológicas, visto que este foi o período que propiciou os maiores valores de R^2 ajustado (em muitos casos, acima de 0,95) e melhor distribuição e normalidade dos resíduos;
- 10) Os ajustes exponenciais foram selecionados visto que diminuía a tendência, observada com uso de modelos lineares, de gerar valores extremos das variáveis relacionadas à maturação no início e final de safra;
- 11) Os modelos propostos são aptos a descrever o processo de maturação da cana-de-açúcar, com excelente desempenho nas avaliações com dados independentes. Contudo, sua aplicação operacional e a outras regiões depende de ajustes ao universo varietal, das condições de colheita (impurezas minerais e vegetais) e dos efeitos do uso de maturadores ou ocorrência de eventos como florescimento e “isoporização”;
- 12) A avaliação do modelo com dados independentes, provenientes de seis safras em diferentes regiões do estado de São Paulo, permitiu verificar sua sensibilidade e confiabilidade em diferentes condições climáticas, demonstrando a viabilidade do uso do modelo em condições diferentes daquelas em que foram gerados os dados que o compuseram.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752 p.
- ALEXANDER, A.G.; SAMUELS, G. Controlled-temperature studies of growth, enzymology, and sucrose production by two sugarcane varieties in Puerto Rico. **Journal of Agriculture**, Puerto Rico, v. 52, p. 204-217, 1968.
- 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).
- ARGENTON, P.E. **Influências das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Piracicaba, São Paulo**. 2006. 109 p. Tese (Doutorado Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- ARIS, R. **Mathematical modeling techniques**. New York: Dover, 1994. 269 p.
- AZEVEDO, H.J. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Araras: Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar, 1981. v. 1, 108p.
- BACHI, 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, nº.2, 1978, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: 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. 142 p. Tese (Doutorado Agronomia, Solos e nutrição de plantas) - 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. In: PLANALSUCAR. Coordenadoria Regional Sul. **Manual da cana-de-açúcar**. Araras, 1977. p. 1-22.
- BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; BASSINELO, A.I.; VILLA NOVA, N.A. Estudos dos efeitos do clima no florescimento da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, nº.3 1981, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: STAB, 1981. v.3, p. 341-362.
- BARNES, A.C. **The sugar cane**. New York: Interscience, 1964. 456p.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 704-716, 1996.

BRODIE, H.W.; YOSHIDA, R.; NICKELL, L.G. Effect of air and root temperatures on growth of four sugarcane clones. **Hawaiian Planters Record**, Honolulu, v. 58, p. 21-52, 1969.

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

BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B.; SCHNEIDER, F.M.; ESTEFANEL, V.; OLIVEIRA, H.T.; DIDONÉ, M.A. Disponibilidade de horas de frio na região central do Rio Grande do Sul: 2 - Distribuição geográfica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 755-759, 2000.

BURR, G.O.; HARTT, C.E.; BRODIE, H.W.; TANIMOTO, T.; KORTSCHAK, H.P.; TAKAHASHI, D.; ASHTON, F.M.; COLEMAN, R.E. The sugarcane plant. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 8, p. 275-308, 1957.

CAIXETA FILHO, J.V. **Pesquisa operacional**. São Paulo: Atlas, 2001. 171 p.

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

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

CARDOZO, N.P. **Temperatura-base e unidades térmicas de crescimento de duas variedades de amendoim**. 2008. 89 p. Trabalho (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2008.

CASTRO, P.R.C. Utilização de reguladores vegetais no sistema de produção da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FISILOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, nº1, Piracicaba, 2000. **Anais...** Piracicaba: STAB, 2000. 1 CD-ROM.

_____. Efeitos da luminosidade e da temperatura na fotossíntese e produção e acúmulo de sacarose e amido na cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 20, n. 5, p. 32-33, 2002.

CHEN, J.C.P. **Sugarcane handbook: a manual for sugarcane manufactures and their chemists**. 11th ed. New York: John Wiley, 1985. 729 p.

CLEMENTS, H.F. integration of climatic and physiologic factors with reference to the production of sugar cane. **Hawaii Planters Research**, Honolulu, v. 44, p. 201-233, 1940.

_____. **Sugarcane nutrition and culture**. Lucknow: Indian Institute Research, 1959. 89 p.

_____. The ripening of sugar cane. **Sugar Y Azúcar**, São Paulo, v. 57, p. 29-78, 1962.

CLEMENTS, H.F.; SHIGUERA, G.; AKAMINE, E.K. **Factors affecting the growth of sugarcane**. Honolulu: University of Hawaii, 1952. 90 p. (Technical Bulletin, 18).

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. Piracicaba, 2006. 117 p.

CROWTHER, J. (Ed.) **Oxford advanced learner's dictionary of current english**. 5.ed. Oxford: Oxford University Press, 1995. 1430p.

DANIELS, J.; ROACH, B.T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D.J. (Ed.). **Sugarcane improvement through breeding**. New York: Elsevier, 1987. p. 7–84.

DE WIT, C.T.; GOUDRIAAN, J. **Simulation of ecological processes**. Wageningen: The Netherlands Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1974. 159 p.

DELGADO-ROJAS, J.S.R. **Modelo agrometeorológico para estimativa dos efeitos de deficiência hídrica na produtividade agro-industrial da cana-de-açúcar**. 1998. 74 p. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

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

DEUBER, R. Maturação da cana-de-açúcar na região Sudeste do Brasil. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4., 1988, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: COPERSUCAR, 1988. p. 33-40.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de H.R. Gheyi e outros. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33).

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

EBRAHIM, M.K.; ZINGSHEIM, O.; EI-SHOUBAGY, M.N.; MOORE, P.H.; KOMOR, E. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 153, p. 593-602, 1998.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2006. 412 p.

EVENSEN, C.I.; MUCHOW, R.C.; EL-SWAIFY, S.A.; OSGOOD, R.V. Yield accumulation in irrigated sugar-cane: I. Effect of crop age and cultivar. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 638-646, 1997.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2003. 240 p.

FERNANDES, A.C.; BENDA, G.T.A. Distribution patterns of Brix and fibre in the primary stalk of sugar cane. **Sugar Cane**, Port Talbot, v. 5, p. 8-13, 1985.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 31-44.

FERREIRA, A.B.H. Aurélio século XXI: o dicionário da língua portuguesa. 3. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.

FNP CONSULTORIA E AGROINFORMATIVOS. **AGRIANUAL 2011**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2011. 482 p.

GAYLER, K.R.; GLASZIOU, K.T. Physiological functions of acid and neutral invertases in growth and sugar storage in sugar cane. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 27, p. 25-31, 1972.

GHELLER, A.C.A. Resultados da aplicação de maturadores vegetais em cana-de-açúcar, variedades RB72454 e RB835486 na região de Araras, SP. In: JORNADA CIENTÍFICA DA UFSCar, 4., 2001, São Carlos. **Resumos...** São Carlos: UFSCar, 2001. p. 30-35.

GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A. The relation between total invertase activity and internode expansion in sugar-cane stalks. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 12., 1965, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam: Elsevier, 1965. p. 575-681.

GLASZIOU, K.T.; WALDRON J.C. Regulation of acid invertase-levels in sugar cane stalks by auxin- and metabolite-mediated control systems. **Nature**, London, v. 203, p. 541-542, 1964.

GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A.; HATCH, M.D.; WHITEMAN, P.C. Physiology of sugarcane: VII. Effects of temperature, photoperiod duration, and diurnal and seasonal temperature changes on growth and ripening. **Australian Journal of Biological Sciences**, Collingwood, v. 18, p. 53-66, 1965.

GLOVER, J. Changes in sucrose % cane and yield of sucrose per unit area associated with cold, drought and ripening. In: SOUTH AFRICAN SUGARCANE TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION, 1971, Durban. **Proceedings...** Durban: SASTA, 1971. p. 158-164.

GRANTZ, D.A. Effect of cool temperatures on photosynthesis and stomatal conductance in field-grown sugarcane in Hawaii. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 22, p. 143-155, 1989.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005. 688 p.

HARTIGAN, J.A. **Clustering algorithms**. New York: Wiley, 1975. 351 p.

HATCH, M.D.; GLASZIOU, K.T. Sugar accumulation cycle in sugarcane. II. Relationship of invertase activity to sugar content and growth rate in storage tissue of plants grown in controlled environments. **Plant Physiology**, Rockville, v. 38, p. 344-348, 1963.

HILL, J.N.S. Availability of soil water to sugarcane in Natal. In: ANNUAL CONGRESS SOUTH AFRICAN SUGAR TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION. **Proceedings...** Pretoria: SASTA, 1966. v. 41, p. 276-282.

HORII, J. A qualidade da matéria-prima na visão agrícola. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 91-93, 2004.

HUMBERT, R.P. **The growing of sugar cane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. 779 p.

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**, South Africa, v. 8, p. 93-99, 1991.

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

_____. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N.G.; DE JAGER, J.M. Effect of water stress on sugarcane stalk growth and quality. In: ANNUAL CONGRESS SOUTH AFRICAN SUGAR TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION, **Proceedings...** Pretoria: SASTA, 1988. v. 62, p. 140-144.

INMAN-BAMBER, N.G.; KIKER, G. **CANEGRO 3.10.DSSAT version 3.1**. Honolulu: University of Hawaii, 1997. 60p.

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.F.; HEWITT, M.L.; XU, J. Source-sink differences in genotypes and water regimes influencing sucrose accumulation in sugarcane stalks. **Crop Pasture Science**, Collingwood, v. 60, p. 316–327, 2009.

JONES, C.A. A review of evaporation studies in irrigation sugarcane in Hawaii. **The Hawaiian Planters' Record**, Honolulu, v.50, p. 195-214, 1980.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, n. 3/4, p. 235-265, 2003.

KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, New York, v. 23, p. 187-200, 1958.

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. 48, p. 27-36, 1999.

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

KEATING, B.A.; CARBERRY, P.S.; HAMMER, G.L.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, M.J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N.I.; HARGREAVES, J.N.G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; McLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J.P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K.L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; McCOWN, R.L.; FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 267-288, 2003.

KINGSTON, G., HAM, G.J. Water requirements and irrigation scheduling of sugarcane in Queensland. I. Water requirements of sugarcane in Queensland. In: CONFERENCE OF QUEENSLAND SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS. **Proceedings...** Townsville: QSST, 1975. p. 57-65.

KOEHLER, P.H.; MOORE, P.H.; JONES, C.A.; CRUZ, A.D.; MARETZKI, A. Response of drip-irrigated sugarcane to drought stress. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 906-911, 1982.

KROPFF, M.J.; MUCHOW, R.C.; RABBINGE, R.; AGGARWAL, P.K. Limits to intensive agricultural systems and opportunities for sustainable agricultural development. In: KEATING, B.A.; WILSON, J.R. (Ed.). **Intensive sugarcane production: meeting the challenges beyond 2000**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 17–35.

LAVANHOLI, M.G.D.P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 697-722.

LEGENDRE, B.L. Ripening of sugarcane: effects of sunlight, temperature, and rainfall. **Crop Science**, Madison, v. 15, p. 349-352, 1975.

LEITE, G.H.P. **Maturação induzida, alterações fisiológicas, produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)**. 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônomicas Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.

LEVY, M.C.T.C. **Avaliação de cenários da produção agrícola visando a sustentabilidade do uso das terras de Piracicaba (SP)**. 1995. 104 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

LINGLE, S.E. Seasonal internode development and sugar metabolism in sugarcane. **Crop Science**, Madison, v. 37, p. 1222-1227, 1997.

_____. Effect of transient temperature change on sucrose metabolism in sugarcane internodes. **Journal American Society of Sugarcane Technologists**, Florida, v. 24, p. 132-141, 2004.

LINGLE, S.E.; IRVINE, J.E. Sucrose synthase and natural ripening in sugarcane. **Crop Science**, Madison, v. 34, p. 1279-1283, 1994.

LINGLE, S.E.; SMITH, R.C. Sucrose metabolism related to growth and ripening in sugarcane internodes. **Crop Science**, Madison, v. 31, p. 172-177, 1991.

LISSON, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 321-335. 2005.

LIU, D.L.; HELYAR, K.R. Simulation of seasonal stalk water content and fresh weight yield of sugarcane. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 82, p. 59-73, 2002.

LIU, D.L.; KINGSTON, G.; BULL, T. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including sub optimum and

supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 90, p. 119-139, 1999.

LOPEZ-HERNANDEZ, J.A. The quality of flowering cane. **Sugar y Azucar**, São Paulo, v. 60, p. 41-42, 1965.

MACHADO, E.C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, cap. 1, p. 56-87.

MAMET, L.D.; GALWEY, N.W. A relationship between stalk elongation and earliness of ripening in sugarcane, **Experimental Agriculture**, New York, v. 35, p. 283-291, 1999.

MARTINÉ, J.F. **Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre em zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle**. 2003. 130 p. Thèse (Docteur) – Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2003.

MENDONÇA, J.R.; NOCITI, P.R.H.; DEOTTI, R.C. Estudo de diferentes épocas de corte em cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 2., 1984, Piracicaba. Piracicaba: Centro de Tecnologia COPERSUCAR, 1984. p. 140-149.

MINITAB. **Methods and Formulas**: MINITAB programa estatístico, versão 16 para Windows. Pennsylvania, 2010.

MONTEITH, J. The quest balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 695-697, 1996.

MOORE, P.H. Temporal and spatial regulation of sucrose accumulation in the sugarcane stem. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 22, p. 661-679, 1995.

MOORE, P.H.; BOTHA, F.C.; FURBANK, R.T.; GROF, C.P.L. Potential for overcoming physio-biochemical limits of sucrose accumulation. In: KEATING, B.A.; WILSON, J.R. (Ed.). **Intensive sugarcane production: meeting the challenges beyond 2000**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 141-155.

MOTULSKY, H.; CHRISTOPOULOS, A. **Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression: a practical guide to curve fitting**. 4th ed. San Diego: GraphPad Software, 2003. 351 p.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. to the Australian sugar industry: climatic and biological factors. In: KEATING, B.A.; WILSON, J.R. (Ed.). **Intensive sugarcane production: meeting the challenges beyond 2000**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 37-54.

NABLE, R.O.; ROBERTSON, M.J.; BERTHELSEN, S. Response of shoot growth and transpiration to soil drying in sugarcane. **Plant and Soil**, The Hague, v. 207, p. 59-65, 1999.

NAGUMO, M. Elevação do teor de sacarose com uso de Roundup em solo de alta fertilidade, In: SEMINÁRIO ROUNDUP EFEITO MATURADOR, 1., 1993, Guarujá. **Anais...** Guarujá: Monsanto, 1993. p. 47-60.

NASSIF, D.S.P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

O'CALLAGHAN, J.R.; HOSSAIN, A.H.M.S; DAHAH, M.H.; WYSEURE, G.C.L SODOCOM: A solar driven computational model of crop growth. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 11, p. 293-308, 1994.

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

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

PEACOCK, S.D.; STARZAK, M. Modelling of climbing film evaporators. **Proceedings of South African Sugarcane Technology Association**, Bangkok, v. 70, p. 213–220, 1996.

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

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

ROBERTS, J.; NAYAMUTH, R.A.; BATCHELOR, C.H.; SOOPRAMANIEN, G.C. Plant-water relations of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under a range of irrigated treatments. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 17, p. 95-115, 1990.

ROBERTSON, M.J.; DONALDSON, R.A. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off of sugarcane before harvest. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, p. 201-208, 1998.

ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; DONALDSON, R.A.; INMAN-BAMBER, N.G.; WOOD, A.W. Estimating the risk associated with drying-off strategies for irrigated sugarcane before harvest. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 50, p. 65-77, 1999.

ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W.; CAMPBELL, J.A. Accumulation of reducing sugars by sugarcane: effects of crop age, nitrogen supply and cultivar. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 49, p. 39-50, 1996.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCELTM para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SAES, L.A.; SAKAI, E.; CAMARGO, A.P.; SILVA, F.C.; CESAR, A.A.M.; MOREIRA, R.S. Avaliação preliminar do potencial agrônômico de algumas variedades de cana-de-açúcar no município de Pariqueira-Açú, no Vale do Ribeira. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 26, p. 35, 1990.

SALASSI, M.E.; BREAU, J.B.; NANQUIN, C.J. Modelling within-season sugarcane growth for optimal harvest system selection. **Agricultural Systems**, Essex, v. 73, p. 261-278, 2002.

SCARPARI, M.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.

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

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

_____. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 5, p. 622-628, 2009.

SHAW, H.R. An international glance at sucrose content of cane. In: VIII CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGY. **Proceedings...**, Kingston, 1953. v. 8, p. 283-289.

SHETIYA, H.L.; DENDSAY, J.P.S. Morpho-physiological and quality traits in sugarcane in response to post emergence treatment with 2-chloroethyl-phosphonic acid. **Indian Sugar**, New Delhi, v. 41, n. 1, p. 37-40, 1991.

SINGH, S.; VENKATARAMA, S. Physiological studies on growth and sucrose accumulation in early and late maturing varieties of sugarcane. In: COIMBATORE SUGAR BREEDING INSTITUTE. **Annual report**. Coimbatore: CSBI, 1983. p. 104-107.

SNEATH, P.H.; SOKAL, R.R. **Numerical taxonomy**: the principles and practice of numerical classification. San Francisco: W.H. Freeman, 1973. 573 p.

SOLER, C.M.T. **Uso do modelo CERES-MAIZE para previsão de safra do milho “safrinha”**. 2004. 146p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

STATSOFT. **STATISTICA v.9 (data analysis software system)**. Tulsa, 2010.

STEHLE, H. The principal agronomic aspects of the flowering of sugar cane; growth, methods of cultivation, maturity, deterioration after arrowing, rippen point of cutting. In: BRITISH WEST INDICES SUGAR TECHNOLOGY. **Proceedings...** Barbados: BWIST, 1955. p. 49-62.

STENDER, H.K. Some sugar cane growth measurements. **Hawaiian Planters' Record**, Honolulu, v. 28, p. 472-495, 1924.

STUPIELLO, J.P. Cana-de-açúcar como matéria-prima. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 761-804.

_____. Matéria-prima: qualidade total. In: SEMINÁRIO ROUNDUP EFEITO MATURADOR, 1993, Guarujá. **Anais...** Guarujá: Monsanto, 1993. p. 83.

_____. Pureza da cana e seu impacto no processamento. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 18, n. 3, p. 48-53, 2000.

_____. Nitrogênio: qualidade da matéria prima e efeitos na fábrica. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 19, n. 4, p. 13, 2001.

_____. A filha da matéria-prima. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 21, n. 2, p. 12, 2002.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosicas**. 2006. 60 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

TERAMOTO, E.R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) baseados em parâmetros do solo e do clima**. 2003. 86 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TERAUCHI, T.; MATSUOKA, M.; KOBAYASHI, M.; NAKANO, H. Activity of sucrose phosphate synthase in relation to sucrose concentration in sugarcane internodes. **Japan Journal Tropical Agriculture**, Tokyo, v. 44, n. 3, p. 141-151, 2000.

THOMPSON, G.D. Irrigation of sugarcane. **South African Sugar Journal**, Umhlanga Ridge, v. 61, p. 126-131, 1977.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling – A mathematical approach to plant and crop physiology**. 1 ed. New Jersey: The Blackburn Press, 2000. 669 p.

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

TIANCO, A.P.; ESCOBER, T.R. Chemical ripening of sugarcane with CP 41845. **Sugar News**, New Orleans, v. 46, p. 508-531, 1970.

TYMOWSKA-LALANNE, Z.; KREIS, M. The plant invertases: physiology, biochemistry and molecular biology. **Advances in Botanical Research**, London, v. 28, p. 71-117, 1998.

VAN DEN BERG, M.; BURROUGH, P.A.; DRIESSEN, P.M. Uncertainties in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugarcane yield potentials in São Paulo State, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 81, p. 43-55, 2000.

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

VENKATARAMANA, S.; MOHAN NAIDU, K.; SINGH, S. Invertases and growth factors dependent sucrose accumulation in sugarcane. **Plant Science**, Clare, v. 74, p. 65-72, 1991.

VIANA, R.S. **Aplicação de maturadores químicos no final de safra, associada à eliminação de soqueira em área de reforma do canavial**. 2007. 46 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2007.

VIEIRA, I.M.S. **Relações entre níveis de açúcares e atividades das invertases em tecidos de quatro cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) cultivadas à campo**. 129 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

VIEIRA, I.M.S.; OLIVEIRA, E.T.; GALLO, L.A.; BATISTA, T.F.C.; RODRIGUES, R.C. Níveis de açúcares e atividade de invertases em cana-de-açúcar (*Saccharum officinalis*

spp.). I. Cultivares 'NA56-79' e 'CB41-76'. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 71, n. 1, p. 67-92, 1996a.

_____. Níveis de açúcares e atividade de invertases em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). II. Cultivares 'SP70-1143' e 'SP71-799'. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 71, n. 2, p. 197-224, 1996b.

WALDRON, J.C.; GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A. The physiology of sugar cane. IX. Factors affecting photosynthesis and sugar storage. **Australian Journal of Biological Sciences**, East Melbourne, v. 20, p. 1043-1052, 1967.

WALLACH, D.; GOFFINET, B.; BERGES, J.E.; DEBAEKE, P.; LEENHARDT, D.; AUBERTOT, J.N. Parameter estimation for crop models: A new approach and application to a corn model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 4, p. 757-766, 2001.

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

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WOOD, A.W. Application of crop growth models to sugar milling and raw sugar marketing. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints**. Brisbane: CSIRO, 1995. p.97-101.

WU, H.; CHILDRESS, W.M.; LI, Y.; SPENCE, R.D.; REN, J. An integrated simulation model for a semi-arid agroecosystem in the Loess Plateau of North-western China. **Agricultural Systems**, v.52, p.83-111, 1996.

XIN, Z.; BROWSE, J. Cold comfort farm: the acclimation of plants to freezing temperatures. **Plant, Cell and Environment**, Malden, v. 23, p. 893-902, 2000.

YATES, R.A. Effects of environmental conditions and the coadministration of growth retardants on the response of sugarcane to foliar treatment with gibberellin. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, p. 31-35, 1972.