

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

**PREDPOL: Um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando
planejamento otimizado**

Maximiliano Salles Scarpari

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Agronomia. Área de concentração: Fitotecnia**

**Piracicaba
2007**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Maximiliano Salles Scarpari
Engenheiro Agrônomo

PREDPOL: Um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado

Orientador:
Prof. Dr. **EDGAR GOMES FERREIRA DE BEAUCLAIR**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2007

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

Scarpari, Maximiliano Salles

PREDPOL: um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado / Maximiliano Salles Scarpari. - - Piracicaba, 2007.
120 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Cana-de-açúcar 2. Climatologia 3. Modelos matemáticos 4. Produtividade
5. Programação linear 6. Sacarose I. Título

CDD 633.61

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

Dedico esta obra a minha esposa Maria Luiza pelo amor, dedicação e paciência e ao nosso filho Guilherme, luz que nos renova a cada dia; razão de nossas vidas.

Ofereço aos meus pais Antonio Carlos e Maria Elisabete e à minha irmã Ana Carolina. Eternamente eu os amarei.

AGRADECIMENTOS

Ao grande amigo Prof. Dr. Edgar Gomes Ferreira de Beauclair por esses longos anos de ótima convivência e amizade.

Ao Prof. Dr. Valter Barbieri pelo auxílio na metodologia dos graus-dia negativos desde o Mestrado e incentivo no uso do modelo MST.

Ao Prof. Dr. Pedro Jacob Christoffoleti pela compreensão e ajuda.

À Usina Costa Pinto/COSAN por acreditar na realização deste trabalho na pessoa do gerente agrícola João Américo Beltrame.

Ao Prof. Dr. Marcos Silveira Bernardes pelas sugestões e empréstimo do aparelho de leitura do IAF.

Ao Dr. Luis Fernando Sanglade Marchiori pela ajuda e a todos os funcionários da Fazenda Experimental Areão.

À FAPESP por aprovar e financiar o projeto.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” por esses longos e inesquecíveis anos e a todos do Departamento de Produção Vegetal.

A todas as pessoas e lugares que me passaram e passam “energias positivas” e alegria em viver.

“Quando renunciamos aos nossos sonhos e encontramos a paz, temos um pequeno período de tranqüilidade. Mas os sonhos mortos começam a apodrecer dentro de nós e a infestar todo o ambiente em que vivemos. O que queríamos evitar no combate, a decepção e a derrota, passa a ser o único legado de nossa covardia.”

Diário de um Mago (Paulo Coelho)

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 DESENVOLVIMENTO.....	12
2.1 Modelos matemáticos.....	12
2.1.1 Usos potenciais e limitações dos modelos.....	12
2.1.2 Histórico da modelagem na cana-de-açúcar.....	13
2.2 Estrutura dos principais modelos de simulação visando estimativa da sacarose.....	14
2.2.1 APSIM – Sugarcane.....	14
2.2.2 CANEGRO.....	15
2.2.3 QCANE.....	16
2.3 Fatores que atuam direta ou indiretamente na maturação da cana-de-açúcar.....	18
2.3.1 Temperatura do ar.....	18
2.3.2 Umidade do solo.....	19
2.3.2.1 Crescimento das raízes.....	21
2.3.3 Fotossíntese.....	22
2.3.3.1 Radiação fotossinteticamente ativa (PAR).....	23
2.3.3.2 Temperatura do ar.....	23
2.3.3.3 Movimento do ar.....	24
2.3.3.4 Idade das folhas e plantas.....	24
2.3.3.5 Crescimento da área foliar.....	25
2.3.3.6 Perfilhamento.....	26
2.3.3.7 Disponibilidade hídrica.....	26
2.3.4 Respiração.....	27
2.3.5 Florescimento.....	29
2.3.6 Variedades.....	30
2.4 Pesquisa Operacional.....	30
2.4.1 Programação Linear.....	30
2.5 Planejamento estratégico.....	31

2.5.1 Plantio.....	31
2.5.2 Colheita.....	32
2.6 Material e métodos.....	32
2.6.1 Descrição das áreas e amostragem.....	32
2.6.2 Breve descrição das variedades utilizadas na calibração do modelo.....	36
2.6.3 Estrutura do modelo e cálculo dos parâmetros considerados.....	37
2.6.3.1 Graus-dia negativos (°C).....	37
2.6.3.2 Armazenamento disponível (mm).....	39
2.6.3.2.1 Crescimento das raízes.....	39
2.6.3.3 Produção de carboidratos.....	40
2.6.3.3.1 Relação entre a produção de carboidratos e a energia solar.....	40
2.6.3.3.2 Relação entre a produção de carboidratos e o índice de área foliar (IAF).....	41
2.6.3.3.3 Determinação da produção bruta de carboidratos não corrigida.....	44
2.6.3.3.4 Correção da produção bruta de carboidratos.....	45
2.6.3.3.4.1 Correção devido ao índice de área foliar ($C_{(IAF)}$).....	45
2.6.3.3.4.2 Correção devido à temperatura do ar $C_c(t)$ e $C_n(t)$	46
2.6.3.3.4.3 Correção devido à idade da cultura $C(i)$	46
2.6.3.3.4.4 Respiração de crescimento (C_{rc}).....	46
2.6.3.3.4.5 Respiração de manutenção (C_{rm}).....	47
2.6.3.3.4.6 Correção devido à disponibilidade hídrica (C_{dh}).....	47
2.6.3.3.4.7 Correção devido ao florescimento (C_f).....	48
2.6.3.4 Partição dos fotoassimilados.....	49
2.6.4 Planejamento estratégico.....	49
2.6.5 Forma de análise dos resultados.....	50
2.7 Resultados e discussão.....	51
2.7.1 Modelo otimizado de planejamento agrícola de colheita.....	84
3 CONCLUSÕES.....	94
REFERÊNCIAS.....	95
ANEXOS.....	108

RESUMO

PREDPOL: Um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado

A cultura da cana-de-açúcar é submetida durante o seu desenvolvimento a diferentes condições ambientais e de manejo sendo a maturação afetada diretamente por estas condições. Destas condições, surge a necessidade de se quantificar as respostas da cultura aos diferentes estímulos para fins de planejamento. Modelos de previsão da qualidade da matéria-prima tornam-se ferramentas importantes na lavoura canavieira, em especial a previsão da curva de acúmulo de sacarose nos colmos, objetivando suprir estimativas de rendimento ao longo da safra, visando à caracterização das alternativas de manejo, aumentando a eficácia das decisões gerenciais e estratégicas. Os objetivos deste trabalho foram desenvolver modelos empíricos capazes de obter estimativas de ATR - Açúcar Total Recuperável nas variedades RB 72 454, RB 85 5156, RB 85 5536, SP 81-3250 e SP 80-1842 ao longo da safra, utilizando dados referentes aos fatores de produção, gerando uma ferramenta que auxilie a tomada de decisão e o planejamento estratégico; medir a variação espaço-temporal do IAF - índice de área foliar e o ATR das variedades RB 85 5156 e SP 80-3280 ao longo de um ciclo para calibração do modelo, simulando os demais; confirmar e relacionar a influência do armazenamento disponível, queda sazonal da temperatura do ar (graus-dia negativos) e quantidade de carboidratos assimilados na maturação da cana-de-açúcar além de otimizar o planejamento agrícola utilizando a Pesquisa Operacional. Foram analisados os dados da Usina Costa Pinto/COSAN, localizada no município de Piracicaba – SP, dos anos safras 1998/1999, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002 e 2002/2003 considerando a maturação, idade do canavial, solos, variedades, florescimento, aplicação de maturadores e manejo, utilizando-se de modelos estatísticos de estimativa da maturação e planejamento agrícola otimizado na safra 2003/2004. Todos os modelos de previsão para cana-soca mostraram-se significativos sendo uma ótima ferramenta de auxílio para o planejamento agrícola otimizado. O planejamento do corte otimizado promoveu uma distribuição homogênea da matéria-prima para a indústria ao longo dos meses de safra, obtendo o máximo lucro possível com os recursos considerados.

Palavras-chave: Climatologia; Modelos de cultura; Produtividade; Programação linear; Sacarose

ABSTRACT

PREDPOL: A forecast model of sugarcane maturation seeking optimized planning

Sugarcane grows under different weather and handling conditions that directly affect crop maturation. These conditions cause the requirement of quantifying the responses of the culture to the different stimuli for planning purposes. Forecast models for the quality of raw material are important tools in the sugarcane farming, in especial the forecast curve of sucrose accumulation in the stems. These models aim to supply yield estimates along the culture cycle, seeking the characterization of handling alternatives and increasing the efficacy of management and strategic decisions. The objectives of this work were to develop empiric models capable to obtain estimates of TRS - Total Recoverable Sugar in the varieties RB 72 454, RB 85 5156, RB 85 5536, SP 81-3250 and SP 80-1842 along the crop cycle, by using referring data to the production factors, generating a tool that helps the outlet decision and the strategic planning; to measure the space-temporary variation of LAI - leaf area index and TRS of the varieties RB 85 5156 and SP 80-3280 along a cycle for calibration of the model, simulating the others; confirm and relate the influence of available soil water storage, seasonal decreasing of air temperature (negative degree-days) and amount of carbohydrates assimilated in the maturation of sugarcane, besides optimizing the agricultural planning using the Operational Research. The Costa Pinto/COSAN sugar-mill (Piracicaba – SP) database was analyzed considering the maturation, age of the culture, soils, varieties, flowering, ripeners and handling for the years crops 1998/1999, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002 and 2002/2003, utilizing statistical test models of maturation estimate and agricultural planning optimized in the crop 2003/2004. All the forecast models for ratoon were significant as an excellent tool for help the optimized agricultural planning. The planning of optimized cutting promoted a homogeneous distribution of raw material for industry along the months of crop, obtaining the maximum possible profit with the considered resources.

Keywords: Climatology; Crop models; Productivity; Linear programming; Sucrose

1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das maiores e mais antigas exploradas no Brasil e no Estado de São Paulo, assumindo grande importância sócio-econômica. Na safra 2005/2006, o Estado de São Paulo representou 60% da moagem nacional totalizando 255.140.812 toneladas de colmos processados, colocando a cultura como responsável por 35% do PIB do Estado (FNP, 2006). Por consequência, projetos e estudos que objetivem uma redução dos custos de produção e melhor planejamento ao longo da safra tornam-se necessários.

É fato que a cada ciclo, a cultura é submetida durante o seu desenvolvimento a diferentes condições ambientais e de manejo como temperaturas baixas, estresse hídrico, fotoperíodo, épocas de corte, aplicação de vinhaça e maturador, sendo a maturação afetada diretamente por estes fatores. Dessa variação, surge a necessidade de se quantificar as respostas da cultura aos diferentes fatores de produção para fins de planejamento. Hoje, existe a certeza de que a interação entre os fatores acaba sendo mais importante do que cada fator em si, e como são muitos os fatores envolvidos e suas interações, tornam-se praticamente impossível determinar as melhores alternativas a cada momento sem a elaboração de cenários bem fundamentados a serem analisados através de modernas ferramentas de gestão (BEAUCLAIR, 2004). Assim, modelos de previsão da qualidade da matéria-prima são ferramentas importantes na lavoura canavieira, objetivando suprir estimativas de rendimento ao longo dos meses de safra, visando à caracterização das alternativas de manejo, aumentando a eficácia das decisões gerenciais e estratégicas (BEAUCLAIR; SCARPARI, 2002; BOOTE; JONES; PICKERING, 1996).

Dentro deste contexto, o planejamento estratégico de colheita da cana-de-açúcar busca otimizar o retorno econômico da cultura baseado no conceito de que a cana tem uma época, durante a safra, conhecida como pico de maturação mais propícia para a colheita, onde ocorre a máxima concentração de sacarose nos colmos. Inevitavelmente, o planejamento da colheita sendo otimizado ou não, utiliza estimativas de produção agrícola para dimensionar recursos e realizar cronogramas de execução e seqüenciamento de operações (BEAUCLAIR; PENTEADO, 1984; CRANE et al., 1982; SALASSI; BREAUX; NAQUIN, 2002). A elaboração de um planejamento estratégico deve envolver os diferentes setores da empresa, ou seja, a integração entre a área agrícola, industrial, comercial e financeira, considerando-se a base física, financeira e o fluxo de caixa. A complexidade do problema torna sua solução dependente de modernos recursos de

Pesquisa Operacional, como modelos de gestão que, entretanto, são extremamente dependentes da capacidade de construir estimativas e cenários confiáveis (BEAUCLAIR, 2004).

Os objetivos deste trabalho são: i) desenvolver modelos empíricos de previsão da maturação para as variedades RB 72 454, RB 85 5156, RB 85 5536, SP 81-3250 e SP 80-1842, capazes de obter estimativas de ATR – Açúcar Total Recuperável (CONSECANA, 2002) em quilogramas de sacarose por tonelada de cana-de-açúcar, ao longo da safra, utilizando dados referentes aos fatores de produção e a regressão linear múltipla, gerando uma ferramenta que auxilie a tomada de decisão e o planejamento estratégico; ii) medir a variação espaço-temporal do IAF e temporal do ATR das variedades RB 85 5156 e SP 80-3280 ao longo de um ciclo para calibração do modelo e obtenção de alguns parâmetros, simulando os demais; iii) confirmar e relacionar a influência do armazenamento disponível, queda sazonal da temperatura do ar em termos de graus-dia negativos e quantidade de carboidratos assimilados na maturação da cana-de-açúcar além de iv) otimizar o planejamento agrícola utilizando a Pesquisa Operacional e a linguagem GAMS - General Algebraic Modeling System (BROOKE et al., 1998).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Modelos matemáticos

Modelos matemáticos são representações idealizadas para situações do mundo real. As análises de sistemas ecológicos partem da premissa de que o estado de qualquer sistema, em qualquer momento, pode ser caracterizado quantitativamente e suas mudanças podem ser descritas através de equações matemáticas (WIT; GOUDRIAAN, 1974). Apesar da dificuldade na validação dos modelos, sempre haverá indicação do nível de sucesso do processo da modelagem. O processo da modelagem é descrito na Figura 1.

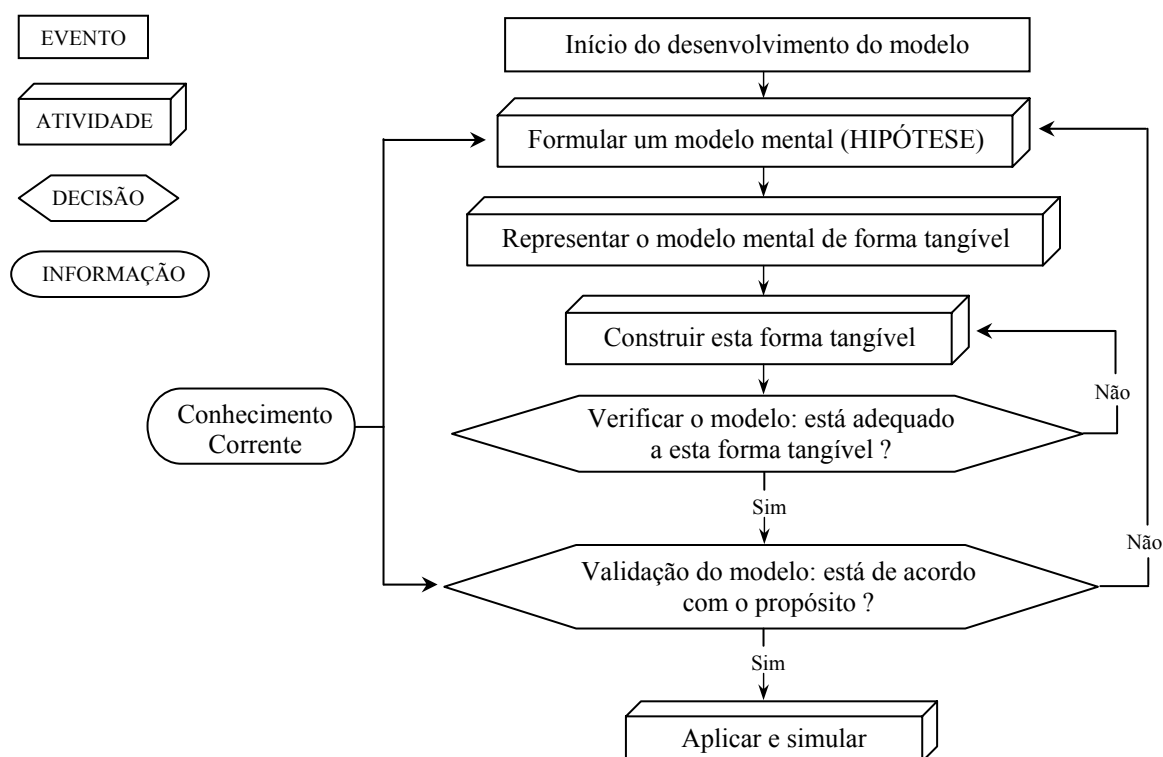


Figura 1 - Atividade da modelagem (Estados Unidos, 1978)

2.1.1 Usos potenciais e limitações dos modelos

Modelos matemáticos são ferramentas particularmente valiosas, pois sintetizam a pesquisa além de integrarem todos os processos estudados isoladamente pelos pesquisadores. Hipóteses científicas podem ser examinadas pelos investigadores definindo prioridades (DOURADONETO et al., 1998). Utilizando um modelo simples, a hipótese fica restrita ao desempenho de um sistema com poucos fatores relacionados, ficando evidente quando este não responde a mudanças

ambientais ou a fatores de administração. Modelos mais complexos estão associados a determinados processos ou então com respostas da cultura a um fator particular. São ferramentas de pesquisa interdisciplinar que integram o conhecimento, resultando em aplicações além da ciência individual. Além disso, podem organizar os dados de um ou mais experimentos; auxiliar a melhoria genética e aumento do rendimento potencial, simulando as características genéticas das plantas como foi demonstrado na cultura do arroz (HORTON, 2000); verificar os efeitos da taxa fotossintética nas folhas; prever rendimentos; administrar a irrigação e a adubação; prever as respostas da cultura a diferentes espaçamentos; efeitos de mudanças climáticas na cultura; otimizar o planejamento de plantio e colheita (BOOTE; JONES; PICKERING, 1996; VAN ITTERSUM et al., 2003).

Modelos simples são de fácil compreensão e freqüentemente requerem menos dados, sendo mais fácil o seu uso e aplicação. Quando possível, devem ser simplificados utilizando empirismos racionais incorporando informações de vários níveis de organização, criando relações precisas, assim operando de modo equilibrado. Essas características simples podem criar um modelo limitado em mecanismos, limitando a habilidade em descrever diferenças genotípicas, em processos fisiológicos e em responder a uma gama extensiva de práticas culturais inclusive quando utilizado em locais distintos (RITCHIE, 1989). A eficiência do uso da radiação - RUE é uma simplificação adotada em muitos modelos. Tem a vantagem de ser simples e relativamente estável em condições normais, além de evitar a necessidade de se modelar a respiração separadamente da fotossíntese. Porém, a RUE não pode ser assumida constante quando as condições de temperatura, água, nitrogênio e radiação não são ótimas; assim, mesmo os modelos simples precisam incluir funções que descrevem suas variações (BOOTE; JONES; PICKERING, 1996). Outras limitações incluem o custo de obtenção dos dados e a variabilidade espaço-temporal existente nas áreas de aplicação dos modelos.

2.1.2 Histórico da modelagem na cana-de-açúcar

O início da modelagem em meados da década de 1970 na cana-de-açúcar ocorreu simultaneamente em três países. Bull e Tovey (1974) iniciaram na Austrália gerando posteriormente o APSIM – Sugarcane (KEATING et al., 1999) e o QCANE (LIU; BULL, 2001). Thompson (1976) desenvolveu na África do Sul um modelo relacional simples, precursor do atual modelo CANEGRO/DSSAT (BEZUIDENHOUT, 2000; INMAN-BAMBER; KIKER,

1997). No Brasil, Ometto (1974) deu o primeiro passo até o SIMCANA (PEREIRA; MACHADO, 1986) e o MST (BARBIERI, 1993). Esses modelos já demonstravam a importância do conhecimento da qualidade futura da matéria-prima, porém não priorizavam avaliar os processos envolvidos na maturação e sim no crescimento (O'LEARY, 2000), deixando uma lacuna na tomada de decisão de corte e na estimativa confiável da maturação como verificado por Beauclair e Penteadó (1984). Esses autores afirmaram que o procedimento usual para determinar a época ideal de corte das áreas, consiste inicialmente na seleção dessas áreas a serem amostradas para análise tecnológica, onde os parâmetros de maturação são considerados. Em seguida, escolhem-se para o corte os locais com os maiores valores de ATR (Figura 2).

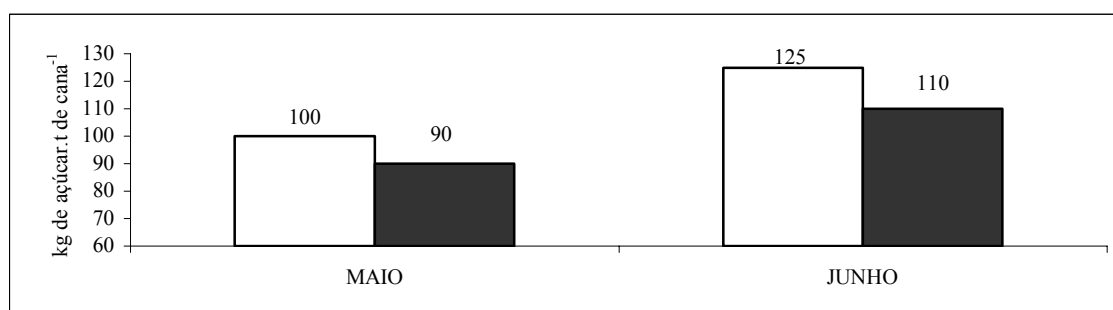


Figura 2 - Situação teórica da evolução do ATR de duas variedades em função do mês de safra

Esse procedimento insere o risco de colher-se uma área que, apesar de conter no momento a maior quantidade de ATR é também aquela que apresenta potencial de incremento desse atributo para uma colheita futura superior ao de outras áreas, e que o adiantamento do corte dessa área, substituindo-a por outra que no momento tem menor quantidade de ATR, aumentaria a produção total de ATR considerando-se toda a safra. Vê-se que para estimar esse aumento, o mais indicado seria o uso de um modelo de previsão da maturação, o qual fornece subsídios para a tomada de decisão de corte em um número muito maior de áreas aptas, cada uma com combinações de parâmetros e potenciais de produções de açúcar diferentes, demonstrando a importância do conhecimento da qualidade futura da cana.

2.2 Estrutura dos principais modelos de simulação visando estimativa da sacarose

2.2.1 APSIM – Sugarcane

O modelo APSIM inclui uma coleção de módulos (MCCOWN et al., 1996). O módulo APSIM – Sugarcane (KEATING et al., 1999) simula a fixação de carbono utilizando a eficiência

do uso da radiação variável com a temperatura e com os teores de nitrogênio desvinculada da transpiração. Valores fixos para o coeficiente de extinção e transpiração são usados para cana-planta e socas. O índice de área foliar é relacionado com a soma térmica e com o acúmulo de biomassa, sendo utilizado para o cálculo da radiação solar interceptada. A produção diária de biomassa é fracionada em folhas, ponta, colmos e raízes utilizando frações de partição que mudam com a fase fenológica da cultura.

A quantidade de fotoassimilados acumulados diariamente no colmo é dividida em sacarose armazenada ou biomassa de colmo dependendo da idade da planta. Estresse hídrico, déficit de nitrogênio e temperatura são aplicados na simulação da partição da sacarose na planta (Figura 3). O efeito do estresse hídrico é simulado adotando métodos de outros modelos como a expansão foliar reduzida, e mais severamente, redução do crescimento. O efeito do déficit de nitrogênio no crescimento é feito por aproximação semelhante ao utilizado no modelo CERES-Maize (JONES; KINIRY, 1986).

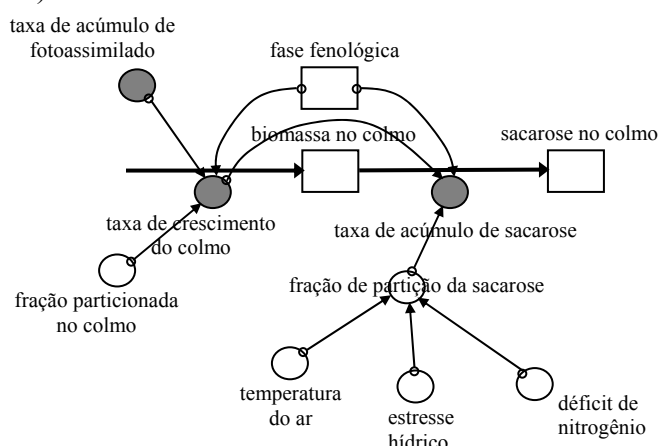


Figura 3 - Modelo conceitual de sacarose obtido do APSIM - Sugarcane (KEATING et al., 1999) descrevendo variáveis endógenas \bigcirc , taxas virtuais (sombreado) e estado \square , com o fluxo de biomassa e sacarose \longrightarrow e informação \rightarrow . Fase fenológica está definida como uma variável estado de outro sub-modelo. Adaptado de O'Leary (2000)

2.2.2 CANEGRO

O modelo CANEGRO iniciou-se com o desenvolvimento das equações de fotossíntese e respiração (PENNING DE VRIES; BRUNSTING; VAN LAAR, 1974) surgidas na escola de Wageningen e pela necessidade em determinar qual a época ótima de colheita na indústria açucareira Sul-africana (INMAN-BAMBER, 2000) sendo atualmente integrante do sistema

DSSAT (JONES et al., 2003). Após, foram acrescentadas melhorias nos cálculos de fotossíntese, respiração de crescimento e manutenção. Nenhum efeito direto da temperatura na fotossíntese foi incluído. Os cálculos de balanço de água também foram melhorados pela inclusão da equação de evapotranspiração potencial de Penman-Monteith (INMAN-BAMBER; CULVERWELL; McGLINCHEY, 1993). Novos dados experimentais foram incorporados melhorando os parâmetros fenológicos para o desenvolvimento de folhas e colmos juntamente com os fatores de partição de biomassa para as raízes. O CANEGRO também utiliza o módulo de nitrogênio do CERES-Maize (JONES; KINIRY, 1986), que por sua vez não foi calibrado nas áreas deficientes em nitrogênio necessitando de maiores estudos (O'LEARY, 2000).

A simulação do acúmulo de sacarose no colmo foi incluída recentemente e de modo empírico (Figura 4). As relações utilizadas sempre foram consideradas uma alternativa prática para simular a partição, porém até agora sem sucesso por falta de conhecimento (MUCHOW; ROBERTSON; WOOD, 1996).

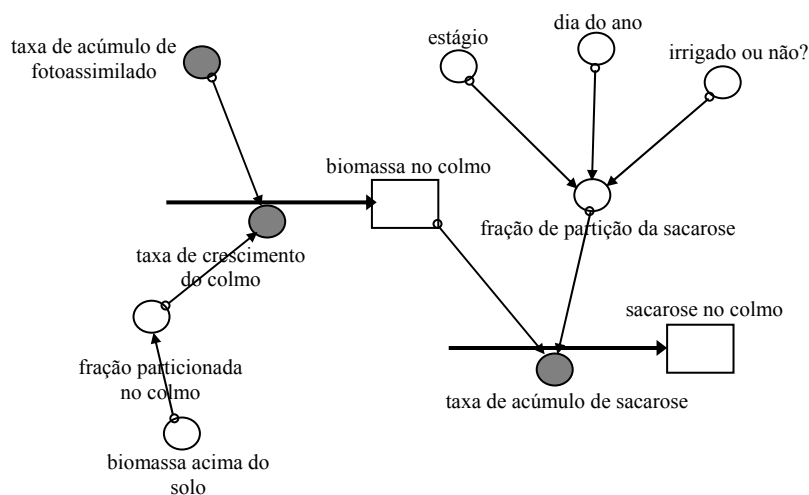


Figura 4 - Modelo conceitual do acúmulo de sacarose obtido do CANEGRO (INMAN-BAMBER; KIKER, 1997) descrevendo variáveis endógenas \bigcirc , taxas virtuais (sombreado) e estado \square , com o fluxo de biomassa e sacarose \rightarrow e informação \rightarrow . Adaptado de O'Leary (2000)

2.2.3 QCANE

O modelo QCANE é o resultado de um projeto iniciado pelo Bureau of Sugar Experiment Stations em Queensland - Austrália originado do trabalho de Bull e Tovey (1974). Evoluiu de

forma mecanicista com ênfase na fotossíntese, respiração e partição de fotoassimilados (LIU; BULL, 2001). Nele, todo fotoassimilado produzido diariamente é dividido em biomassa estrutural ou sacarose nas diferentes partes da planta.

Uma característica fundamental deste modelo é a simulação do uso da sacarose pela planta podendo ser utilizada como carbono estrutural ou na respiração de manutenção, dependendo das exigências. A fotossíntese diária total é determinada pela radiação fotossinteticamente ativa e a temperatura, calibrada em dados experimentais locais (HARTT; BURR, 1967). A respiração é dividida em porções para manutenção e crescimento. Taxa constante para respiração de crescimento e de manutenção é determinada utilizando uma função de acúmulo de biomassa e temperatura.

O QCANE aloca os fotoassimilados como uma função de crescimento diário, desenvolvimento e temperatura para as variáveis estado (Figura 5). As exigências respiratórias e de crescimento devem ser prioritariamente atendidas no equilíbrio de alocação da sacarose, sendo projetado para aumentar o acúmulo de sacarose quando a temperatura for baixa e a radiação solar alta como proposto por Beauclair e Scarpari (2002).

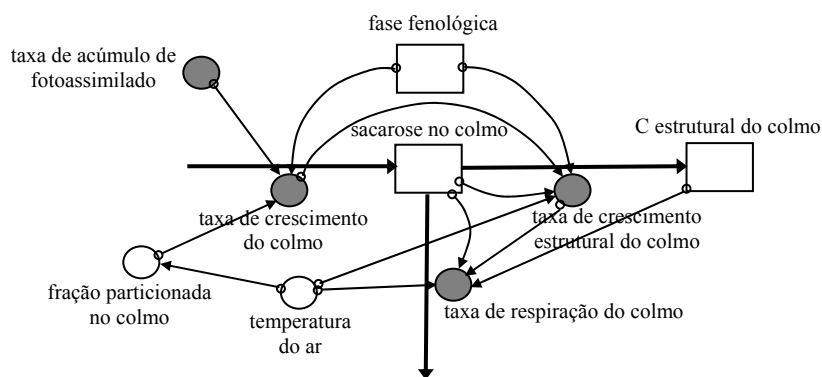


Figura 5 - Modelo conceitual de sacarose obtido do QCANE (LIU; BULL, 2001) descrevendo variáveis endógenas \bigcirc , taxas virtuais (sombreado) e estado \square , com o fluxo de biomassa e sacarose \longrightarrow e informação \rightarrow . Fase fenológica está definida como uma variável estado de outro sub-modelo. Modificado de O'Leary (2000)

2.3 Fatores que atuam direta ou indiretamente na maturação da cana-de-açúcar

2.3.1 Temperatura do ar

A diminuição da temperatura do ar tem papel fundamental na maturação da cana-de-açúcar, responsável pela redução no ritmo do desenvolvimento vegetativo para o acúmulo de sacarose nos colmos (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004b). Alexander (1973) descreve que o processo de maturação fisiológica depende da redução sazonal da temperatura do ar freando 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. Glover (1972) também notou que baixas temperaturas aumentam o conteúdo de sacarose nos colmos.

Quando as noites são frias, o desenvolvimento é lento e há aumento na concentração de sacarose. Entretanto, temperaturas noturnas abaixo de 10°C diminuem a produção de piruvato, ortofosfato e malato nas folhas, existindo um limite abaixo do qual a redução da temperatura deixa de favorecer o acúmulo de sacarose (DU; NOSE; WASANO, 1999), razão pela qual o modelo QCANE considera o intervalo de 10 a 25°C como o ideal nas equações de partição de fotoassimilados para as diversas partes da planta (LIU; BULL, 2001). Waldron; Glasziou e Bull (1967) observaram em câmaras de crescimento que a inibição fotossintética é significativa quando a temperatura noturna é de 7°C.

Na bibliografia especializada, verifica-se uma inconsistência quanto à informação dos parâmetros térmicos principalmente relacionados à temperatura basal. Para dados obtidos em ambientes controlados, a temperatura basal é freqüentemente calculada da relação linear entre um período de desenvolvimento e do intervalo de temperatura testado. No campo, a determinação dos parâmetros térmicos é ainda mais complicada porque não há temperatura constante na qual a taxa de crescimento possa ser relacionada diretamente (LIU; KINGSTON; BULL, 1998).

Barbieri, Bacchi e Villa Nova (1979) determinaram a temperatura basal em torno de 20°C. Já Bacchi e Sousa (1977) em torno de 18 a 19°C. Uma possível explicação para esta estimativa incompatível da temperatura basal é que em condições de campo, temperaturas mínimas ou máximas diárias ultrapassam o valor da temperatura basal. Nestas condições, os métodos existentes influenciam normalmente o acúmulo da soma térmica (LIU; KINGSTON; BULL, 1998). 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 basal, gerando valores distintos para um mesmo local. Outro agravante na determinação da temperatura basal é o processo de aclimação ao frio desenvolvido pelas plantas. Numerosos efeitos fisiológicos e bioquímicos ocorrem modificando a sensibilidade das plantas às baixas temperaturas e por conseqüência o crescimento pode ou não ser interrompido (XIN; BROWSE, 2000).

Como a maturação é induzida e acelerada pelo abaixamento da temperatura do ar, um método proposto para correlacionar a maturação e a temperatura do ar é pela soma dos graus-dia negativos que diariamente, no gráfico horário de temperaturas correspondem à área compreendida entre a reta da temperatura basal e a curva da temperatura na sua porção abaixo da temperatura basal, conforme descrição de Scarpari (2002) e Scarpari e Beauclair (2004b).

2.3.2 Umidade do solo

Além da temperatura do ar, a umidade do solo também poderá atuar na maturação. Humbert (1968) observou que para ocorrer o processo de maturação fisiológica e acúmulo de açúcar em locais onde não há redução sazonal da temperatura do ar, a cultura deve ser submetida a uma seca moderada. Este fator bem como as baixas temperaturas e a deficiência nutricional restringem a alongação do internódio, resultando no aumento do conteúdo de sacarose pela reduzida demanda de fotoassimilados nas regiões meristemáticas. Desta forma, o conteúdo de sacarose depende ainda da radiação solar, temperatura, teor de água e biomassa do colmo.

Déficits hídricos provocaram redução na área foliar e no acúmulo de biomassa, porém com um pequeno impacto no rendimento final devido ao pouco tempo de exposição e a habilidade da planta em produzir folhas e colmos em condições úmidas subsequentes (WIEDENFELD, 2000). Por outro lado, um déficit hídrico severo quando o dossel já está bem formado, com índice de área foliar - IAF superior a 2 ocasiona um impacto maior na produtividade de colmos e de sacarose, apresentando reduções significativas na concentração de sacarose apenas quando a biomassa do colmo cai abaixo de 50% daquela do controle sem déficit hídrico (ROBERTSON et al., 1999). Inman-Bamber (2004) concluiu que o acúmulo de biomassa é grandemente reduzido com déficit hídrico superior a 120 mm anuais e o acúmulo de sacarose no colmo é afetado com déficit hídrico superior a 145 mm anuais. Scarpari e Beauclair (2004b) relataram que uma seca superior a 130 mm nos meses que antecedem a colheita, já afeta o acúmulo de sacarose no colmo.

Esse limiar de quanto seria o déficit hídrico ideal para não interferir no acúmulo de sacarose ainda não está devidamente esclarecido.

O processo de contabilidade hídrica no solo mais utilizado para fins climatológicos é o método do Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) que consiste do confronto entre a precipitação e a evapotranspiração, considerando uma determinada capacidade de retenção de água no solo, segundo as características físicas dos solos, bem como em função do tipo de cobertura vegetal. Além da evapotranspiração potencial ou de referência (E_{to}) que é a medida de consumo hídrico usado pelo sistema solo-planta envolvendo a transpiração da água armazenada no solo pela planta e a evaporação da água pela superfície do solo, sem ocorrência de déficits hídricos para a planta; o Balanço hídrico possibilita estimar ainda a evapotranspiração real ou atual (E_{ta}) sendo definida como o consumo hídrico de dado vegetal em qualquer estágio de desenvolvimento e em qualquer condição de umidade do solo; a evapotranspiração máxima (E_{tm}) sendo o valor multiplicado de E_{to} por um coeficiente de cultura (K_c) o qual depende do estágio de desenvolvimento do vegetal, portanto da área foliar, do espaçamento e da densidade de plantas, parâmetros estes variáveis com a espécie e a variedade considerada, com a época do ano e com a latitude do local; o excedente hídrico, que é a água que excede a capacidade máxima de retenção, sujeita à percolação e ao escoamento superficial; a deficiência hídrica, que é a quantidade de água que deixa de ser evapotranspirada pela falta de umidade e as fases de reposição e retirada de água do solo, que representem a variação no armazenamento (BARBIERI, 2000).

Na estimativa da E_{to} , o modelo CANEGRO utiliza a equação de Penman-Monteith com modificações ajustadas especificamente para cana-de-açúcar (INMAN-BAMBER, 2000). Em contraste, o APSIM – Sugarcane modela a eficiência de uso da água estimada através da biomassa corrigida pelo déficit de pressão de vapor. A demanda de transpiração é modelada em função da taxa de crescimento diária dividida pela eficiência de uso da água. Quando a tensão de água é reduzida, reduz também a taxa de expansão foliar e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada, seguindo conceitos do modelo CERES-Maize (KEATING et al., 1999). Mesmo utilizando métodos distintos, os modelos simulam com um grau aceitável de precisão o uso da água pela cultura (INMAN-BAMBER; McGLINCHEY, 2003).

Barbieri et al. (1997) propuseram mudanças no método do Balanço hídrico introduzindo o conceito de K_c (coeficiente de cultura) variável com o crescimento da área foliar (TERUEL,

1995) e a variação da CAD - Capacidade de Água Disponível (DOORENBOS; KASSAM, 1979) ao longo do perfil do solo e exploração das raízes.

2.3.2.1 Crescimento das raízes

O conhecimento do comportamento no ciclo do crescimento das raízes é de fundamental importância para fins de modelagem. A velocidade de crescimento e a forma de distribuição das raízes no perfil do solo são características importantes para o bom suprimento de água e nutrientes às plantas e variam acentuadamente com a idade da planta e em cana-planta ou soca.

A forma de distribuição das raízes foi estudada por Alvarez, Castro e Nogueira (2000) onde 70% das raízes se concentraram até os 40 cm de profundidade no perfil do solo analisado. Korndörfer, Primavesi e Deuber (1989) estudando cinco variedades na fase de cana-planta observaram que 89 a 92% das raízes se localizavam nos primeiros 30 cm do solo. Na cana-soca, 85 a 92% das raízes se localizavam no horizonte de 0 a 40 cm. Ball-Coelho et al. (1992) encontraram 62% da matéria seca total de raízes nos primeiros 50 cm de profundidade, com uma variação de 38 a 48% das raízes vivas nos 30 cm superficiais. Quando se trata de massa total de raízes, a referência é das raízes mais próximas aos colmos da touceira, sendo esse padrão mais marcante nas camadas superficiais do solo.

No APSIM – Sugarcane, a massa do sistema radicular cresce em função da produção de biomassa da parte aérea daquele dia. A biomassa de raiz é convertida em comprimento de raiz específico na relação de 18.000 mm.g^{-1} . A senescência da raiz é simulada pela morte de 0,2% do comprimento da raiz e biomassa por dia, sendo que na colheita morrem 17% das raízes em todas as camadas de solo (BALL-COELHO et al., 1992; KEATING et al., 1999). Entretanto, como as raízes são de desenvolvimento aberto e possui meristema, sua replicação é infinita, não sendo adequado considerar sua senescência (FOSKET, 1994). O ideal na modelagem seria considerar sua condutividade hidráulica (Figura 6) ao longo do ciclo que é menor em raízes mais velhas (VAN ANTWERPEN; MEYER; INMAN-BAMBER, 1993).

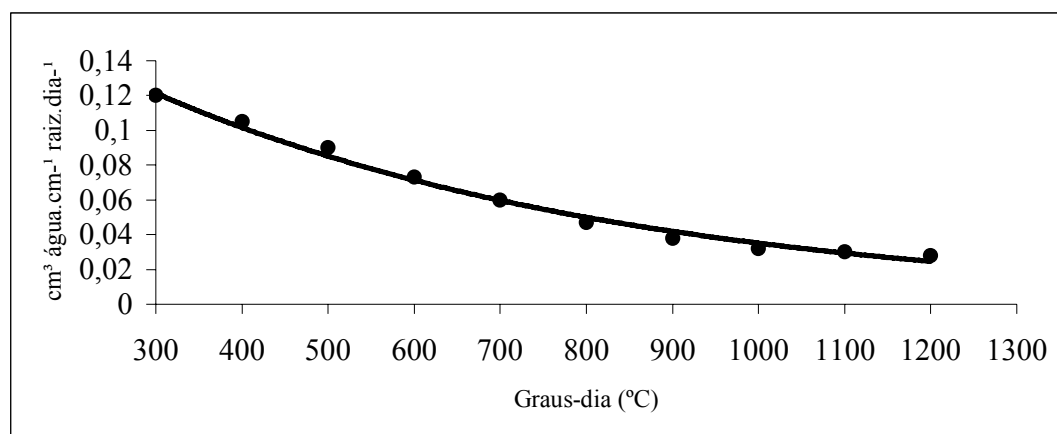


Figura 6 - Absorção de água pelas raízes em função da soma térmica ($Tb = 10^{\circ}\text{C}$) para variedade NCo376 plantada em vasos

Van Antwerpen (1999) relacionou o comprimento das raízes da variedade NCo376 com o índice de área foliar e a disponibilidade hídrica em função dos graus-dia acumulados durante o ciclo da cultura. Em condições irrigadas, modelou a extração de água pelas raízes até os 1,2 m de profundidade. Em condições de estresse hídrico, este valor pode chegar a 2,1 m de profundidade dependendo do tipo de solo.

2.3.3 Fotossíntese

A radiação solar é armazenada para seu uso futuro via fixação em biomassa pelo processo da fotossíntese. Neste processo, o CO_2 do ar é convertido em carboidratos $(\text{CH}_2\text{O})_n$ através da seguinte reação:



Existem diferenças na eficiência do uso da radiação solar entre as plantas, principalmente entre plantas do tipo C_3 e C_4 . Para níveis baixos, a diferença na eficiência é pequena, mas a taxa de assimilação em condições próximas da saturação lumínica é muito maior para plantas do tipo C_4 também pela ausência da fotorrespiração em folhas jovens (ALEXANDER, 1973). Essas diferenças se confirmam pela presença nas plantas C_4 de uma estrutura de folha especializada chamada de anatomia Kranz (coroa), alta eficiência no uso da água, ponto de compensação de CO_2 muito baixo e alta taxa de crescimento com valores de temperatura e radiação solar elevado (HATCH, 2002).

2.3.3.1 Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)

A radiação fotossinteticamente ativa - PAR, cuja faixa de comprimento de onda varia de 400 a 700 nm não é rotineiramente medida de acordo com Barbieri (1993) embora esta informação seja sempre requerida para muitos propósitos incluindo a modelagem. A relação entre a PAR e a radiação solar é de 0,45 quando a elevação solar excede 30° sobre o horizonte. Esta estimativa, entretanto ignora a contribuição da radiação difusa que se espalha através das moléculas de gás na atmosfera e que contém uma proporção muito mais alta da PAR se comparada à radiação direta. Quando a elevação solar excede 40°, a relação calculada da PAR somando a radiação solar direta e o componente difuso é de aproximadamente 0,60. Combinando os componentes diretos e difusos em proporções apropriadas, a relação entre a PAR e a radiação solar está perto de 0,50 (MONTEITH, 1972; SINCLAIR; MUCHOW, 1999).

Os efeitos da intensidade luminosa foram observados por Bull (1969) descrevendo que a taxa de absorção em folhas jovens de cana excede a 100 mg de CO₂.dm⁻².h⁻¹ com radiação solar de 1,7 cal.cm⁻².min⁻¹ equivalente a 0,85 cal.cm⁻².min⁻¹ na fração da PAR, sendo atenuada exponencialmente em função do sombreamento, existindo grande variação entre as variedades (MACHADO, 1987) e estresse hídrico (GLOVER, 1974). No estudo de Muchow et al. (1997) a máxima eficiência do uso da radiação solar na cana-de-açúcar considerando as perdas na produção de carboidratos foi de 2 g de CH₂O.MJ⁻¹.

A transmissão da radiação solar no dossel de uma cultura pode ser estimada pela Lei de Beer de acordo com Barbieri (1993). O coeficiente de transmissão varia com o ângulo de incidência da radiação, ou seja, com a inclinação solar, latitude, espaçamento e características foliares implicando na variação do coeficiente de extinção (*k*) conforme relata Machado (1981). Inman-Bamber (1994) utilizou um coeficiente de extinção variável ao longo do dia entre 0,55 a 0,58 para a variedade NCo376.

2.3.3.2 Temperatura do ar

A taxa fotossintética aumenta com a temperatura até 30°C, estabiliza-se entre 30 e 34°C, decrescendo em temperaturas mais elevadas. O decréscimo da taxa verificada em temperaturas elevadas esta relacionada com o fechamento dos estômatos devido à perda da turgidez celular. Decréscimo da temperatura do ar de 23°C para 14°C provoca queda de 84% na taxa

fotossintética. Temperatura das raízes em torno dos 16,7°C decresce a taxa fotossintética em 83% em relação à temperatura controle de 22,2°C (HARTT; BURR, 1967).

Noites e manhãs frias reduzem a assimilação de gás carbônico e a condutância estomática, determinando a magnitude da troca gasosa do dia seguinte, diminuindo também a translocação noturna de carboidratos. No inverno, temperatura foliar de 14°C diminui a assimilação de carbono em 50% comparado à temperatura foliar de 20°C. No verão, temperatura foliar de 20°C pode ser suficientemente para a redução da assimilação (GRANTZ, 1989).

2.3.3.3 Movimento do ar

O movimento de entrada do CO₂ da atmosfera para os estômatos pode afetar a fotossíntese. A turbulência do ar do lado de fora das folhas aumenta o movimento do CO₂ e reduz a espessura da camada limite do ar na qual esse ocorre somente por difusão. Maior difusão de CO₂ é governada pela permeabilidade da cutícula, comportamento estomático, quantidade de estômatos, gradiente de concentração e intensidade luminosa (BARBIERI, 1993). Outros fatores, como aumento da transpiração foliar e distribuição de insetos e doenças, também ocorrem em função do movimento do ar.

Irvine (1971) observou que aumentando a velocidade do vento e a intensidade luminosa, há um acréscimo na taxa fotossintética pelo aumento do teor de CO₂ na planta. Para cada cm.s⁻¹ aumentado na velocidade há um acréscimo de 10 mg de CO₂.dm⁻².h⁻¹ na taxa fotossintética. Com alta intensidade luminosa e um aumento no fluxo de ar para 6,5 cm.s⁻¹ ocorre um aumento na taxa fotossintética em torno de 47% nas plantas isoladas, porém com menor porosidade e abertura estomática. Entretanto, o fluxo de ar dentro do dossel não foi estudado, sendo dependente da orientação das linhas de plantio, perfilhamento e acamamento dos colmos. Apenas observou-se que com uma velocidade média do vento de 22 km.h⁻¹, abaixo das folhas mais altas do dossel têm-se velocidades menores que 1 km.h⁻¹. Assim, maiores estudos são necessários para modelar a influência do vento na fotossíntese, sendo primordial conhecer o seu comportamento dentro do dossel.

2.3.3.4 Idade das folhas e plantas

Para Van Dillewijn (1952), a morte e substituição das folhas ocorrem durante todo o ciclo da planta, de forma que o número médio permanece praticamente constante em torno de nove

folhas vivas por colmo. Inman-Bamber (1994) relacionou a senescência foliar com o aparecimento da folha e com o conteúdo de água no solo, sendo a senescência foliar acelerada em períodos de estresse hídrico. A senescência dos perfilhos ocorre após o fechamento do dossel atingir 70% de interceptação da PAR.

À medida que o colmo envelhece, a taxa assimilatória decresce, observação apresentada por Bull (1969), detectando um decréscimo de 60% dos dois meses para os 18 meses de idade da planta. Esta taxa decresce até os 15 meses permanecendo constante após essa idade. Nas socas, a taxa fotossintética é novamente alta nas folhas. Com isso a taxa mais alta é atingida quando o colmo é jovem em cana-planta e socas (HARTT; BURR, 1967).

2.3.3.5 Crescimento da área foliar

As folhas são responsáveis diretas pela transformação da radiação solar em energia química através da fotossíntese, influenciando diretamente a produtividade. A fração da radiação interceptada é determinada pelo índice de área foliar - IAF dado pela razão entre a área total das folhas verdes e a área de solo (WATSON, 1947). Além de estar ligada com a radiação, o desenvolvimento da área foliar está fortemente relacionado com a temperatura em condições de estresse hídrico, e com as características da planta como taxa de perfilhamento, surgimento e expansão de folhas, além do tamanho das mesmas (MUCHOW; CARBERRY, 1989; ROBERTSON et al., 1998).

O comportamento do crescimento foliar durante o ciclo da cultura pode ser relacionado com o acúmulo de graus-dia e déficit hídrico (TERUEL, 1995) sendo que para cada estágio da cultura existem diferentes IAFs (Figura 7) como verificado por Leme; Maniero e Guidolin (1984).

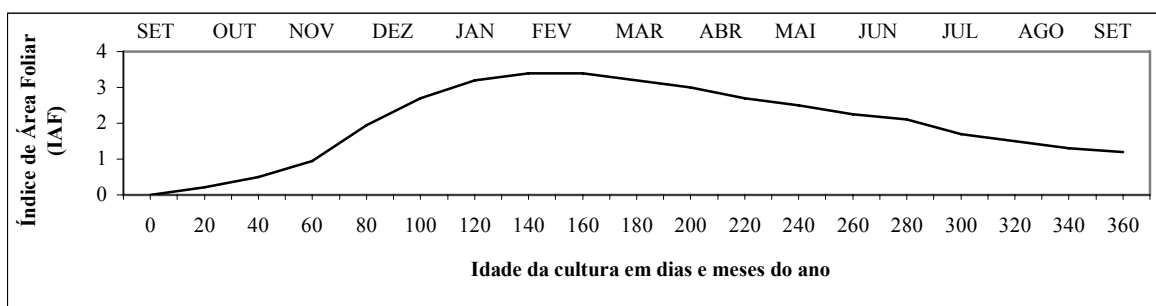


Figura 7 - Relação entre o índice de área foliar e a idade da cultura, durante o ciclo de cana-soca.

Estudando a área foliar com relação à interceptação da PAR, Inman-Bamber (1994) verificou o fechamento quase completo quando o IAF torna-se maior que quatro. Este fato determina a aceleração do amarelecimento e morte das folhas, explicando que superfícies foliares maiores que quatro praticamente não aumentam a assimilação (BEZUIDENHOUT, 2000).

2.3.3.6 Perfilhamento

Algumas práticas agrícolas têm influência sobre o perfilhamento como o espaçamento e a característica varietal, além da luminosidade, temperatura e umidade do solo (CASAGRANDE, 1991). Três processos biológicos atuam no perfilhamento sendo a brotação e o perfilho primário, com maior capacidade de captação da radiação, os secundários e terciários e a senescência. Um broto é emitido da gema sendo denominado de perfilho primário. Com o aparecimento, desenvolverá folhas e começará a perfilhar formando uma touceira que conterá o perfilho primário e vários outros de mais alta ordem denominados, perfilhos secundários e terciários (VAN DILLEWIJN, 1952). Todo este processo é regulado pela auxina que é formada no ápice e desce pela ação da luz em fluxo contínuo ou célula a célula em direção à base, não atuando no desenvolvimento das gemas laterais. A auxina exerce um efeito de alongamento do colmo no ápice e na base induz a gema basal promovendo a brotação dos perfilhos secundários e terciários.

Em condições satisfatórias o número de perfilhos aumenta rapidamente, seguindo então por uma fase de senescência, quando o número diminui até estabilizar (BEZUIDENHOUT, 2000). Inman-Bamber (1994) relacionou a soma térmica com o aparecimento de perfilhos. A densidade de perfilhos atingiu um pico com 500°C.d e com 1500°C.d ocorre o começo da senescência. A densidade de perfilhos é constante após 2000°C.d tendo diferenças varietais, porém Casagrande (1991) cita que este valor é de 12 perfilhos.m⁻¹.

2.3.3.7 Disponibilidade hídrica

O estresse hídrico na planta influencia a fotossíntese ocasionando uma severa redução na síntese de carboidratos e na expansão foliar, porém no momento em que é fornecida água, ela retoma imediatamente o crescimento em ritmo constante (ALEXANDER, 1973).

Diferentemente da evapotranspiração potencial (Eto), a evapotranspiração atual (Eta) é mais difícil estimar pelos parâmetros que envolvem as medidas do consumo hídrico em situações climáticas e fisiológicas adversas. Há grande dificuldade em integrar as relações de consumo

hídrico quando o solo passa a restringir água para a raiz, considerando também às resistências no caminho da água da raiz às folhas. Desta forma, o vegetal não consegue manter as folhas túrgidas, fechando os estômatos ou ainda diminuindo a área foliar, afetando a taxa fotossintética. Sempre devemos considerar que mesmo o solo estando na capacidade de campo, se a demanda atmosférica de água for muito grande devido à alta radiação solar, baixa umidade relativa e grande velocidade do vento, o baixo turgor celular pode acontecer caracterizando o estresse hídrico (BARBIERI, 2000).

Algumas metodologias para estimar a E_t foram desenvolvidas, sendo a primeira por Thornthwaite e Mather (1955) na apresentação do Balanço hídrico. Utilizando-se destas mesmas equações, Doorenbos e Kassam (1979) propuseram equações mais precisas na estimativa da E_t , considerando que a E_t torna-se menor que evapotranspiração máxima (E_m) somente após ter-se consumido uma determinada fração de água do solo (p). Até que essa fração (p) seja utilizada, não há redução significativa na produtividade e a cana-de-açúcar é uma das culturas com maior valor da fração (p). Outros pesquisadores desenvolveram estimativas da E_t considerando o fluxo de água no solo e as resistências na planta através das raízes até chegar às folhas, atravessando os estômatos, alcançando a atmosfera (BARBIERI, 2000). Este procedimento é o utilizado pelo modelo APSIM – Sugarcane para simular o efeito do déficit hídrico no rendimento.

O efeito do déficit hídrico age de forma multiplicativa na redução dos rendimentos para alguns autores enquanto outros defendem a aproximação aditiva. Delgado Rojas (1998) considerou o modelo multiplicativo de Jensen (1968) relacionando E_t e E_m juntamente com um coeficiente de sensibilidade ao estresse variável ao longo do desenvolvimento da cultura.

2.3.4 Respiração

Na maioria dos processos de crescimento e manutenção, um organismo respira para produzir intermediários de carbono, energia (ATP) e poder redutor [NAD(P)H], suportando a biossíntese e processos relacionados como o transporte ativo de substratos. A respiração é necessária como provedor de ATP, mantendo a biomassa existente no estado funcional (AMTHOR, 2000).

A liberação de energia dos carboidratos produzidos é descrita pela equação:



Autores como McCree, Wit, Penning de Vries e Thornley já modelaram o processo respiratório (AMTHOR, 2000) sendo 40% do peso dos carboidratos produzidos durante a assimilação perdidos pela respiração. Como visto anteriormente, na cana-de-açúcar a fotorrespiração é ausente, todavia as respirações de crescimento e de manutenção ocorrem.

A eficiência do processo construtivo da respiração de crescimento foi demonstrada por Thornley (1976). Calculando o CO₂ liberado e o substrato consumido durante o crescimento, somando todas as reações bioquímicas (composição da biomassa), equilíbrio de ATP e exigências de NAD(P)H, pode-se modelar a respiração de crescimento.

Com o conhecimento da eficiência de conversão de cada composto químico - proteína, lignina, celulose, lipídios, aminoácidos, bem como a composição química quantitativa da planta, é possível estimar o valor da eficiência global de conversão deste processo. Na cana-de-açúcar, os valores de conversão da glicose foram apresentados por Machado (1981) e estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química, valores de conversão da glicose e requerimento de glicose para biossíntese de 1,0 grama de biomassa

Compostos	Composição da biomassa		Valor de conversão	Necessidade de glicose
	g de fração química.	g de biomassa ⁻¹ x 100	g de produto.g de glicose ⁻¹	g de glicose.fração da biomassa ⁻¹
Proteína	1,5		0,404	0,04
Carboidrato	88,0		0,826	1,06
Lipídeo	0,8		0,330	0,02
Lignina	7,0		0,465	0,15
Total				1,27

Fonte: Machado (1981).

Este método utilizado no cálculo da respiração de crescimento foi simplificado. Inicialmente, os modeladores consideravam sessenta e uma combinações. Penning de Vries; Brunsting e Van Laar (1974) dividiram em cinco grupos sendo: i) compostos nitrogenados, principalmente aminoácidos e proteínas, ii) carboidratos estruturais, iii) lipídios, iv) lignina e v) ácidos orgânicos. Esta simplificação do método possibilitou a aplicação do cálculo na composição da biomassa, ao invés de modelar a respiração de crescimento de forma mais detalhada, o que tornava difícil a obtenção dos dados na estimativa.

Quanto à respiração de manutenção, inclui processos que mantêm as estruturas celulares e gradientes intracelulares de íons e metabólicos, junto com a aclimatação celular nas mudanças ambientais. Processos de manutenção dominantes são resíntese de macromoléculas e transporte ativo. O propósito é manter a funcionalidade celular (AMTHOR, 2000). Pode-se dizer que as

proteínas nas plantas especialmente nas folhas consistem principalmente de enzimas às quais têm existência muito curta, com taxa de deterioração aproximada de 10% por dia à temperatura de 20°C e então são resintetizada (BARBIERI, 1993). Bull e Tovey (1974) apresentaram medidas da taxa de respiração de manutenção nas folhas mostrando uma boa correlação entre a taxa de assimilação fotossintética bruta diária e o total da respiração de manutenção.

2.3.5 Florescimento

O florescimento era tratado anteriormente como um evento coincidente ao aparecimento da panícula em lugar da sucessão de processos, começando com a indução e terminando com a abertura da panícula. Pode ser dividido em cinco passos sendo indução ou estímulo, diferenciação da gema apical em panícula, desenvolvimento, emergência e abertura da panícula (CASAGRANDE, 1991; MOORE, 1987).

O florescimento na cana-de-açúcar causa grandes alterações fisiológicas, principalmente pela inversão da sacarose em glicose e frutose, fenômeno indesejável sob o ponto de vista da qualidade da matéria-prima, sobretudo se acompanhado de intensa “isoporização”. Os fatores ambientais atuam no florescimento, sendo que Alexander (1973) os separa do seguinte modo: fotoperíodo, indutivo ao florescimento quando o comprimento do dia situa-se entre 12 e 12,5 horas, e fatores adicionais, compreendendo a temperatura, precipitação, estado nutricional, idade mínima para indução (período juvenil) e as características genéticas da própria variedade. Temperaturas noturnas acima de 18°C não inibem o florescimento. Baixa umidade relativa do ar e alta umidade do solo estimulam o florescimento. Quando estes três fatores coexistem, ocorre na maioria dos casos o florescimento, dependendo da variedade (BARBIERI; VILLA NOVA, 1977). Temperatura do ar acima de 32°C durante a diferenciação, aborta o desenvolvimento da panícula (BERDING; MOORE, 2001). O efeito negativo do aumento da fertilização nitrogenada no florescimento e a variação da resposta clonal com diferentes níveis de nitrogênio são claramente demonstrados por Gosnell (1973).

Pereira; Barbieri e Maniero (1986) estudaram o florescimento da variedade NA 56-79 em Araras - SP, sendo possível prever com base na ocorrência de temperaturas máximas abaixo e até 31°C e mínimas acima e até 18°C e o fotoperíodo indutivo que ocorre anualmente entre 25 de fevereiro a 20 de março nesta localidade. Iaiá et al. (1985) compararam o efeito do florescimento

na qualidade tecnológica das variedades NA 56-79, SP 70-1143 e IAC 48-65 e verificaram que ocorre sempre redução no teor de sacarose, porém com diferenças entre variedades.

2.3.6 Variedades

Toda variedade possui uma clara tendência de maturação durante a safra, estando ligada diretamente ao teor de sacarose, presença de florescimento e “isoporização”, herança genética, clima, solo, manejo e idade do canavial. As variedades diferem quanto ao tempo que levam para alcançar o pico de maturação, estando esta característica relacionada com a extensão do período de desenvolvimento. Variedades de curto período de desenvolvimento amadurecem mais cedo e aquelas cujo período de desenvolvimento é mais longo a maturação é retardada, mas todas atingem o máximo teor de sacarose entre a segunda quinzena de agosto à primeira quinzena de outubro (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004b). Landell et al. (2004) compararam a curva de maturação expressa pelo teor de sacarose da variedade IAC 91-2195 com a variedade RB 83 5486 e já no início da safra, no mês de abril, a variedade IAC 91-2195 apresentou maior teor de sacarose com 14%, sendo classificada como precoce e de curto período de desenvolvimento. A Universidade Federal de São Carlos - UFSCar (2004) também analisou a precocidade da variedade RB 85 5156, onde esta apresentou maior teor de sacarose com 13,7% no início da safra no mês de maio, em comparação com a variedade SP 80-1842. Variedades classificadas como médias aptas para o corte a partir dos meses de julho e agosto destacam-se a RB 85 5536, a SP 80-1842, a SP 81-3250 e a SP 80-3280. A variedade RB 72 454 cultivada na maior parte dos canaviais paulistas é classificada como tardia sendo apta para o corte a partir do mês de setembro em diante podendo ser antecipado em alguns ambientes em função do clima. Portanto, a caracterização da maturação deve ser específica, gerando modelos para cada variedade estudada.

2.4 Pesquisa Operacional

2.4.1 Programação Linear

A Programação Linear de acordo com Caixeta-Filho (2001) “nada mais é que um aprimoramento de uma técnica de resolução de sistemas de equações lineares via inversões sucessivas de matrizes, com a vantagem de incorporar uma equação linear adicional, representativa de um dado comportamento a ser otimizado”. O Simplex vem sendo o algoritmo mais citado e comentado na maior parte da literatura

especializada assim como o mais utilizado em programas computacionais de Programação Linear (WAGNER, 1986). Avanços em termos de eficiência de algoritmos correlatos puderam ser observados somente a partir do início da década de 80, por meio de trabalhos desenvolvidos por Karmarkar (1984) e pelo crescente avanço computacional.

O primeiro modelo relatado na literatura brasileira utilizando a Programação Linear na cultura foi de Beauclair e Penteadó em 1984. Após, muitos modelos deste tipo surgiram, com pequenas variações no modelo matemático, com maior ou menor inclusão dos fatores e recursos envolvidos no processo. Para Higgins et al. (1998) a rentabilidade de uma usina é influenciada pelos altos custos de moagem, colheita, transporte e armazenamento, onde a otimização destes fatores resulta em 8% de aumento na rentabilidade comparado à prática sem o uso da otimização. Entretanto, sem utilizar ferramentas eficientes na previsão de rendimentos, a aplicação da Programação Linear no planejamento estratégico pode resultar em soluções pouco realistas.

2.5 Planejamento estratégico

2.5.1 Plantio

Uma das principais decisões a serem tomadas no plantio é a escolha da variedade a ser plantada em determinado ambiente de produção, pois perdurará no mínimo cinco anos. Joaquim et al. (1994) propuseram os ambientes de produção para cana-de-açúcar com ênfase nas condições químicas do horizonte subsuperficial e na textura ao longo do perfil do solo dividindo os ambientes em A, B, C, D, E e F. Recentemente, Prado; Landell e Rossetto (2002) fracionaram mais os ambientes considerando a disponibilidade de água, a CTC - Capacidade de Troca Catiônica da camada arável, os atributos mesotrófico e mesoalico na camada subsuperficial e a espessura do horizonte A, além da profundidade do horizonte Bt.

Brunoro e Leite (1999) consideraram a distância média entre a lavoura até a unidade produtora e os custos de transporte como parâmetros chaves para planejar a distribuição ótima das variedades. Entretanto, sabemos que cada variedade expressa o seu potencial em função do ambiente de produção, devendo esta decisão estar baseada também na tipificação do ambiente e não somente nos custos de transporte. Esta forma de análise pode indicar uma vantagem em um ambiente onde a variedade não é recomendada para o plantio, trazendo como conseqüências à redução do número de cortes e a queda na produtividade.

2.5.2 Colheita

As programações do corte e do planejamento agrícola otimizado de uma lavoura canavieira são atividades fundamentais na rentabilidade do empreendimento, pois pode aumentá-la praticamente com baixos custos adicionais (BEAUCLAIR; PENTEADO, 1984). Apesar disso, os recursos operacionais de pesquisa adaptados ao setor sucro-alcooleiro ainda são pouco utilizados, e a tomada de decisão do ponto de vista gerencial é feita de maneira empírica como discutido no item 2.1.2.

Alguns modelos foram desenvolvidos na busca da época ideal de corte por Beauclair e Penteado (1984) e por Mishoe; Jones e Gascho (1979) que obtendo valores previstos de biomassa com um modelo fisiológico simples, maximizaram a colheita considerando área disponível e capacidade de colheita, moagem e replantio. Seguindo esta mesma linha, Crane et al. (1982) utilizaram um modelo empírico para a obtenção dos dados de açúcar recuperável. Com esses valores estimados, construíram um modelo de otimização de colheita e reforma de canaviais. Barata (1992) desenvolveu um modelo de avaliação técnico-econômico do corte e da reforma da cultura considerando seis safras. Pelo acompanhamento da evolução do percentual colhido de cada variedade ao longo dos anos de planejamento, verificou-se que o modelo sugere um padrão de colheita para todas as variedades avaliadas. Com relação à quantidade cortada de cana ocorreu uma concentração para os dois últimos períodos de safra setembro e outubro, fornecendo a indicação de serem estes os meses ideais de colheita na agroindústria canavieira brasileira. Com o avanço computacional (HIGGINS et al., 1998; HIGGINS et al., 2004; SALASSI; BREAU; NAQUIN, 2002), a integração de vários parâmetros no modelo de otimização como produtividade, colheita, carregamento, transporte, indústria, custos de produção e mercado deve ser considerada, tornando-os mais complexos, porém mais representativos da realidade (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004a).

2.6 Material e métodos

2.6.1 Descrição das áreas e amostragem

Este projeto foi desenvolvido no Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP - Setor de Agricultura e na Usina Costa Pinto/COSAN que está localizada no município de Piracicaba - Estado de São Paulo nas coordenadas 22°37' Latitude S e 47°41' Longitude W, com

temperatura média anual de 21,5°C, precipitação média anual de 1.276 mm e altitude média de 520 m. A área plantada na data de 24/04/2002 com a variedade RB 85 5156 têm relevo ondulado e 3,52 ha, com produtividade no primeiro corte feito no dia 29/04/2003 de 83,76 t.ha⁻¹ (Figura 8) e a outra área de estudo plantada na data de 24/07/2002 com a variedade SP 80-3280 apresenta relevo plano e 3,92 ha, com produtividade no primeiro corte feito no dia 02/07/2003 de 108,22 t.ha⁻¹ (Figura 9). O espaçamento de plantio adotado nas áreas é de 1,4 m.

O solo é classificado como Cambissolo Háplico textura média de acordo com a Empresa Brasileira de Agropecuária - EMBRAPA (1999) tendo a seguinte análise química realizada no dia 03/07/2003 na área da variedade SP 80-3280 e no dia 03/05/2003 na área da variedade RB 85 5156 (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise química de solo das áreas experimentais

Variedade	pH	Mo CaCl ₂ g.cm ⁻³	P resina mg.dm ⁻³	mmol.dm ⁻³									
				K	Ca	Mg	H+Al	Al	S	SB	CTC	V%	M%
SP 80-3280													
0-25 cm	5,2	52	128	3,2	82	40	47	1	14	125	172	72	0
25-50 cm	4,5	50	92	5	75	29	64	5	27	109	173	63	4
RB 85 5156													
0-25 cm	4,6	26	13	2,9	46	30	66	12	45	79	145	54	13
25-50 cm	4,3	24	7	1,7	34	30	135	32	112	66	201	32	32

Esta área foi escolhida por representar boa parte das áreas próprias da usina sendo classificada como ambiente D2 (PRADO; LANDELL; ROSSETTO, 2002). Além disso, poucas áreas na usina possuem duas variedades distintas em termos de época de maturação plantadas próximas, pois o planejamento é feito no intuito de cortar todo o setor de uma só vez, evitando o retorno das frentes de corte, carregamento e transporte na mesma área. Apesar de próximas, observa-se maior declividade na área da variedade RB 85 5156 que é menos fértil, sendo possível que uma fração do adubo aplicado seja levado pela enxurrada até a área da SP 80-3280 tornando-a, ao longo do tempo, mais fértil, já que o manejo é semelhante em ambas as áreas.

A calibração do modelo foi realizada nas duas áreas de produção próximas utilizando as variedades SP 80-3280 e RB 85 5156. Utilizou-se o aparelho LI-COR® model 3100 area meter na determinação da área foliar para posterior cálculo do IAF. O IAF das variedades foi medido durante um ciclo da cultura e relacionado com os graus-dia acumulados no período (equações 5 e 6). Nos ciclos posteriores da cultura, estimaram-se o IAF pelos graus-dia (GD) acumulados

usando uma equação não-linear ajustada no programa computacional SAS "Statistical Analysis System" (SAS INSTITUTE, 1989).

Em cada área foram obtidas oito amostras do IAF georeferenciadas pelo GPS - Global Position System marca Garmin eTrex®, gerando mapas geoestatísticos através do programa computacional R (IHAKA; GENTLEMAN, 1996) e os pacotes geoR (RIBEIRO Jr.; DIGGLE, 2001), MASS (VENABLES; RIPLEY, 2002) e splancs (ROWLINGSON; DIGGLE, 1993) a fim de verificar a variabilidade espacial existente nas áreas, além de uma amostragem mensal do ATR (CONSECANA, 2002) para construir a curva de maturação ao longo da safra 2004/2005 das variedades, confirmando suas características quanto à época de maturação. Cada amostra, tanto do IAF como do ATR foi feita colhendo 10 colmos seguidos na linha de plantio ao acaso percorrendo toda a área experimental e submetida à análise. As avaliações do ATR foram feitas no período de 29/04/2004 a 08/12/2004 a cada dois meses aproximadamente.

Para constatar ou não a variabilidade espacial das áreas, realizou-se a medição do Brix - teor de sólidos solúveis pelo menos uma vez no ciclo utilizando o refratômetro de campo gerando o mapa geoestatístico.

As observações climáticas dos anos foram obtidas do Posto Meteorológico do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP que se localiza nas coordenadas 22°42' Latitude S e 47°38' Longitude W e altitude de 546 m, distante 9,6 km das áreas experimentais.

Os dados das safras 1998/1999, 1999/2000, 2000/2001, 2001/2002 e 2002/2003 foram analisados considerando a maturação, idade do canavial, solos, variedades, florescimento, aplicação de maturadores e manejo; testando modelos estatísticos de estimativa da maturação na safra 2003/2004 utilizando o programa computacional SAS "Statistical Analysis System" (SAS INSTITUTE, 1989). Cada amostra obtida na balança ao longo das safras analisadas nos fornece o número do talhão e fazenda, a área, o ambiente, o estágio da cultura, a variedade plantada, o mês do corte anterior; o dia, mês e ano do corte atual e valores da pol, Brix, pureza, fibra e açúcares redutores. Dessa forma, calculou-se o ATR de todas as amostras como proposto pelo CONSECANA, agrupando posteriormente as cinco safras analisadas na construção dos modelos. A estratificação que gerou os arquivos para o procedimento estatístico de regressão no SAS, classificou na seqüência a variedade, o ambiente, o estágio e o corte anterior dividido nos meses de abril, maio e junho; julho, agosto e setembro; outubro, novembro e dezembro.



Figura 8 - Área experimental da variedade RB 85 5156 (29/04/2004)



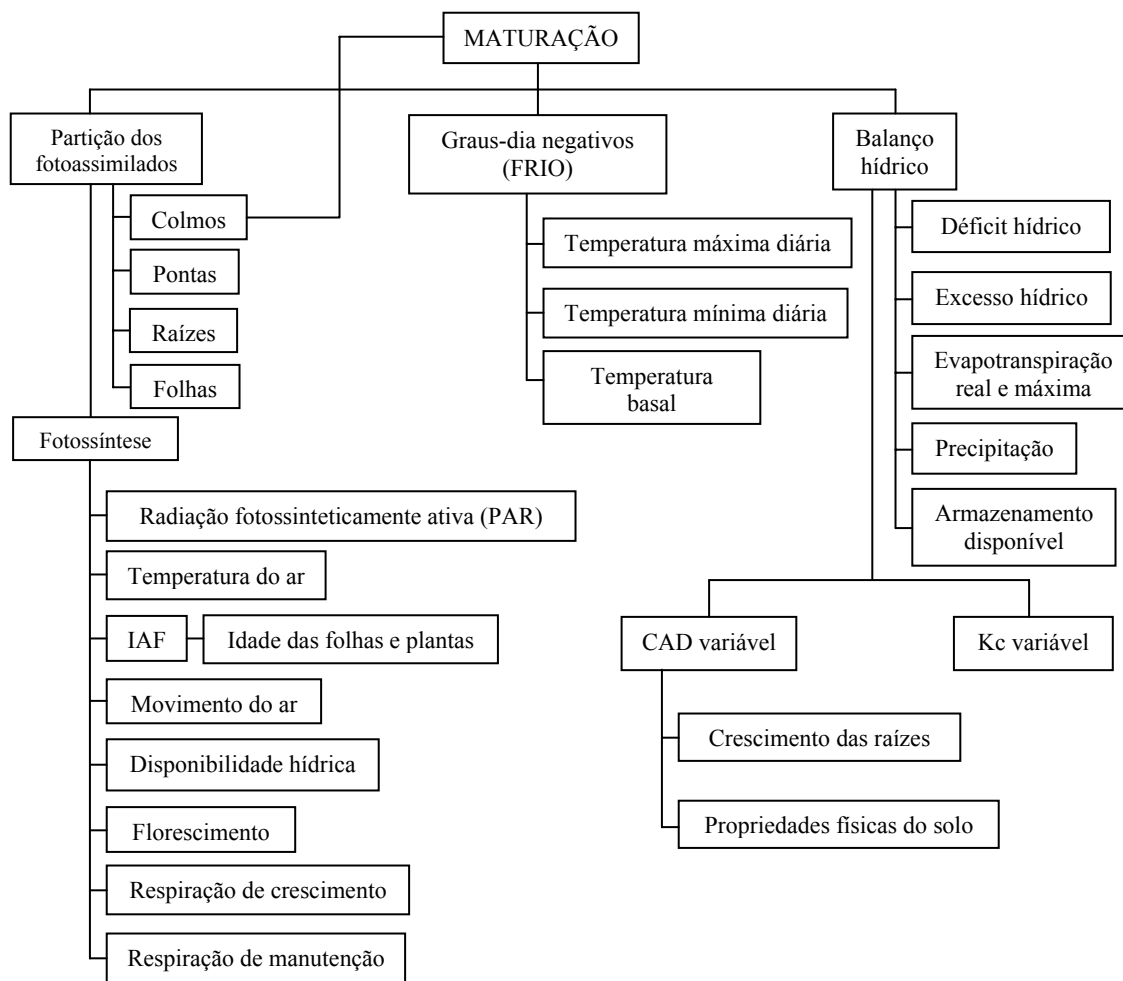
Figura 9 - Área experimental da variedade SP 80-3280 (29/04/2004)

2.6.2 Breve descrição das variedades utilizadas na calibração do modelo

A variedade SP 80-3280 apresenta desenvolvimento inicial vigoroso com rápido fechamento das entrelinhas; hábito final com tombamento médio; colmos de diâmetro médio, uniformes, com despalha média. Apresenta boa produtividade em cana-planta e alta em cana-soca, média exigência em fertilidade do solo, brotação de soqueira muito boa, florescimento médio e pouca isoporização. Resistente às principais doenças, mas suscetível ao amarelinho. A Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo - COPERSUCAR (1997) recomenda plantar em solos de média fertilidade e realizar a colheita a partir de junho onde o teor de sacarose expresso pela pol é alto.

A variedade RB 85 5156 apresenta elevado touceiramento ainda mais intenso na cana-soca, colmos eretos, porém decumbentes na fase adulta, empalhados e diâmetro fino a médio. Tem média produtividade em cana-planta e soca, media exigência em solos, florescimento intenso e pouca isoporização. Resistente às principais pragas e doenças. A UFSCar (2004) recomenda não plantar como cana de ano e colher sempre no início da safra, pois apresenta alta precocidade.

2.6.3 Estrutura do modelo e cálculo dos parâmetros considerados



2.6.3.1 Graus-dia negativos (°C)

O cálculo dos graus-dia negativos foi proposto por Scarpari (2002) e a Figura 10 demonstra como foi calculado este fator, utilizando um método aproximado de integração, onde Arquimedes (287-211 a.C.) foi o primeiro a determinar a área limitada por uma parábola e por uma reta equivalendo a quatro terços da área do triângulo inscrito cujo vértice está no ponto onde a tangente é paralela ao topo da região (SHENK, 1991).

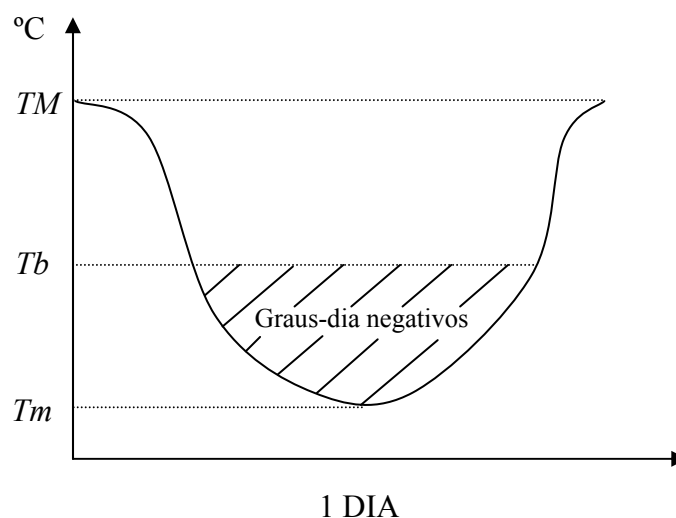


Figura 10 - Graus-dia negativos (°C).

Para $T_b > T_m$

$$\text{Graus-dia negativos} = \int_{T_b}^{T_m} d(T_m) = \frac{4}{3} * \frac{(T_b - T_m)^2}{2(TM - T_m)} \quad (1)$$

Para $T_b \leq T_m$

$$\text{Graus-dia negativos} = 0 \quad (2)$$

onde:

TM = temperatura máxima diária abaixo de 38°C (FAUCONIER; BASSEREAU, 1975),

Tm = temperatura mínima diária acima de 7°C (WALDRON; GLASZIOU; BULL, 1967),

Tb = temperatura basal = 20°C (BARBIERI; BACCHI; VILLA NOVA, 1979).

Quando a temperatura mínima diária estiver entre 7 e 0°C, descontou-se nos graus-dia negativos um valor de 0,47 acumulados a cada grau baixado de 7°C. Este valor empírico foi obtido da própria equação (1), simulando temperaturas mínimas diárias entre 7 e 0°C e máximas diárias entre 30 e 38°C. O desconto foi necessário, pois temperaturas mínimas inferiores a 7°C afetam a assimilação de carbono, a condutância estomática e a taxa fotossintética, determinando a magnitude da troca gasosa do dia seguinte, reduzindo também a translocação noturna de sacarose para os colmos (GRANTZ, 1989; WALDRON; GLASZIOU; BULL, 1967), existindo um acúmulo da sacarose nas células das folhas na tentativa de diminuir o potencial mátrico e a temperatura de congelamento.

2.6.3.2 Armazenamento disponível (mm)

O armazenamento de água disponível foi estimado de acordo com o Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) e as modificações propostas por Barbieri et al. (1997). A capacidade de água disponível (*CAD*) definida por Doorenbos e Kassam (1979) como a profundidade ou altura de água, em milímetros por metro de profundidade de solo, entre o conteúdo de água do solo na capacidade de campo (*CC*) a 0,03 MPa e o conteúdo de água no solo no ponto de murcha permanente (*PMP*) a 1,5 MPa, sendo estimada ao longo do perfil do solo através da equação (3), considerando o trabalho de Prado; Landell e Rossetto (2002) além do Kc utilizando os graus-dia e IAF acumulados ao longo do período (TERUEL, 1995).

$$CAD = \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) \cdot H \cdot dg \quad (3)$$

onde:

CAD = Capacidade de Água Disponível (mm),

CC = capacidade de campo do solo a 0,03 MPa (%),

PMP = ponto de murcha permanente do solo a 1,5 MPa (%),

H = profundidade média de exploração de 80% das raízes (mm),

dg = densidade global (g.cm⁻³).

2.6.3.2.1 Crescimento das raízes

A equação (4) que simula o crescimento em profundidade das raízes da variedade NCo376 (VAN ANTWERPEN, 1999) poderá ser utilizada em função do tipo de solo e da profundidade encontrada sendo relacionada com os graus-dia (GD) descrito nas equações (5) e (6).

$$PR = 2990,34 \cdot GD / (1009,78 + GD) \quad R^2 = 0,999 \quad (4)$$

onde:

PR = Profundidade das raízes em mm para solos com silte + argila > 35%,

GD = Graus-dia considerando *Tb* = 10°C (INMAN-BAMBER, 1994).

Para *Tm* > *Tb*

$$GD = n \cdot \left[\left(\frac{TM + Tm}{2} \right) - Tb \right] \cdot f \quad (5)$$

Para $T_m \leq T_b$

$$GD = n \cdot \left(\frac{(TM - Tb)^2}{2(TM - Tm)} \right) \cdot f \quad (6)$$

sendo:

$$f = \left(\frac{N}{12} \right) \quad (7)$$

N = comprimento do dia em horas,

n = número de dias.

2.6.3.3 Produção de carboidratos

As relações entre a intensidade da radiação solar, temperatura do ar, idade das folhas e das plantas, respiração e crescimento da área foliar com a produção bruta de fotossintetizados já foram apresentadas (BARBIERI, 1993; KEATING et al., 1999; LIU; BULL, 2001) e serão usadas neste trabalho. As influências da disponibilidade hídrica, crescimento radicular e florescimento foram modelados utilizando dados existentes na bibliografia relatados na revisão bibliográfica e através das observações realizadas nas áreas de calibração do modelo.

2.6.3.3.1 Relação entre a produção de carboidratos e a energia solar

A relação entre a intensidade da radiação solar e a produção de carboidratos (Figura 11), pode ser representada pela equação (8) de acordo com Barbieri (1993):

$$CB = \frac{a \cdot I}{1 + b \cdot I} \quad (8)$$

onde:

CB = g de CH_2O produzido. dm^{-2} de folha.hora,

I = radiação solar global em $\text{cal.cm}^{-2}.\text{min}$,

$a = 6,193 \cdot 10^{-2}$,

$b = 0,261$.

As constantes a e b foram determinadas por Barbieri (1993) usando dados de Bull (1969), dependentes da espécie e da variedade, da temperatura do ar e da folha na qual foi submetida para as medidas da taxa fotossintética, com resposta assintótica em folhas individuais.

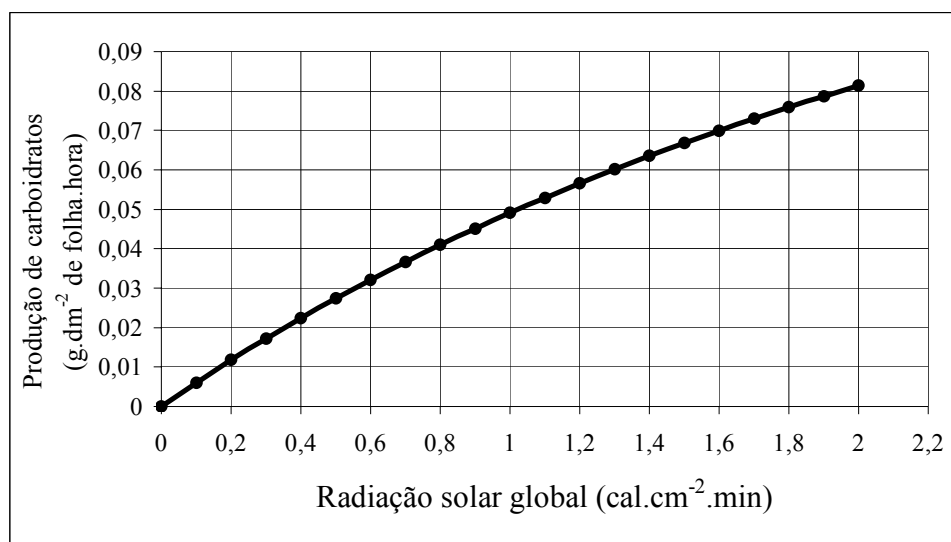


Figura 11 - Produção de carboidratos e a intensidade da radiação solar global

2.6.3.3.2 Relação entre a produção de carboidratos e o índice de área foliar (IAF)

Monsi e Saeki (1953) definiram um modelo de dossel onde cada camada é considerada uniforme, a superfície composta de folhas horizontais, opacas, sem sobreposição e a radiação decai mais ou menos exponencialmente dentro do dossel, análoga à lei de Beer, sendo o IAF o único fator na redução da radiação. Para considerar folhas em diferentes ângulos, temos a razão entre a área de sombra e a área foliar na superfície horizontal definido como coeficiente de extinção (k) (CAMPBELL, 1986).

$$I_{(IAF)} = I_o \cdot e^{-k \cdot (IAF)} \quad (9)$$

onde:

$I_{(IAF)}$ = radiação transmitida após atravessar um dado índice de área foliar (cal.cm⁻².min),

I_o = radiação solar incidente no topo do dossel (cal.cm⁻².min),

k = coeficiente de extinção = 0,58 (BARBIERI, 1993; INMAN-BAMBER, 1994).

A modelagem da fotossíntese é uma solução analítica simples visando integrar as medições fotossintéticas feitas em uma única folha além de simular a atenuação da radiação ao atravessar o dossel, podendo ser utilizado uma aproximação triangular ou senoidal da variação da radiação ao longo do dia. Avaliações prévias dos padrões de variação da radiação diurna indicam que a aproximação triangular proveu uma descrição mais segura na distribuição da radiação através do

dossel (LIU; BULL, 2001). Röhrig; Stützel e Alt (1999) recomendam uma aproximação elipsoidal para um dossel heterogêneo.

Assim, de acordo com Barbieri (1993) substituindo a equação (9) em (8) tem-se:

$$d(CB) = \frac{a.I_o.e^{-k(IAF)_2}}{1 + b.I_o.e^{-k(IAF)_2}}.d(IAF) \quad (10)$$

Integrando a equação (10), a síntese total de carboidratos para o dossel inteiro será:

$$CB_{(IAF)} = \int_0^{IAF} \frac{a.I_o.e^{-k(IAF)_2}}{1 + b.I_o.e^{-k(IAF)_2}}.d(IAF) \quad (11)$$

então

$$CB_{(IAF)} = 10^3 \cdot \frac{a}{b.k} \cdot \ln\left(\frac{1 + b.I_o}{1 + b.I_o.e^{-k(IAF)}}\right) \quad (12)$$

onde:

$CB_{(IAF)}$ = CH₂O sintetizado por um determinado índice de área foliar (kg.ha⁻¹.hora),

I_o = radiação global incidente no topo da cultura,

a, b e k = constantes quantificadas anteriormente.

De acordo com a equação (12), determina-se com boa aproximação a produção de carboidratos para um dia completamente limpo, cuja fração PAR é aproximadamente 0,5 da radiação global (SINCLAIR; MUCHOW, 1999). Considerando um valor médio diário por hora (I_{oc}) e multiplicando este valor pelo número de horas de brilho solar (N) igual ao comprimento do dia tem-se:

$$I_{oc} = \frac{0,8.Q_o}{60.N} = \frac{0,0133.Q_o}{N} \quad (13)$$

I_{oc} = radiação solar média para um dia completamente claro (limpo) (cal.cm⁻².min),

Q_o = radiação no topo da atmosfera (função do ano e da latitude do local), (cal.cm⁻².dia),

0,8 = constante considerando que 80% da Q_o é transmitida para o nível do solo.

Substituindo-se a equação (13) em (12), tem-se:

$$CB_c = 10^3 \cdot \frac{a}{b.k} \cdot \ln\left(\frac{1 + 0,0133.b.\frac{Q_o}{N}}{1 + 0,0133.b.\frac{Q_o}{N}.e^{-k(IAF)}}\right).N \quad (14)$$

onde:

CB_c = carboidrato produzido em um dia completamente limpo ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}$),

Q_o = radiação no topo da atmosfera ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}$),

N = comprimento do dia (horas),

a, b e k = constantes quantificadas anteriormente.

A equação (12), definida para um dia limpo pode ser adequada para um dia completamente nublado, assumindo que nesta condição 20% da radiação Q_o é transmitida para o topo da cultura (radiação difusa), e que a fração fotossinteticamente ativa (PAR) é 1,5 vezes maior que em um dia completamente limpo (BARBIERI, 1993) teremos:

$$I_{on} = 0,2 \cdot 1,5 \cdot \frac{Q_o}{60 \cdot N} \quad (15)$$

sendo:

I_{on} = radiação solar média para um dia completamente encoberto de nuvens (nublado), ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}$),

0,2 = fração da radiação Q_o transmitida pelas nuvens.

Substituindo-se 15 em 12, tem-se:

$$CB_n = 10^3 \cdot \frac{a}{b \cdot k} \cdot \ln \left(\frac{1 + 0,005 \cdot b \cdot \frac{Q_o}{N}}{1 + 0,005 \cdot b \cdot \frac{Q_o}{N} \cdot e^{-k(LAF)}} \right) \cdot N \quad (16)$$

onde:

CB_n = carboidrato produzido em um dia completamente nublado ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}$).

Para facilitar o uso das equações (14) e (16), Barbieri (1993) calculou os valores mensais de Q_o e N sendo apresentados nas Tabelas 3 e 4. Vale lembrar que as equações (14) e (16) estimam o carboidrato bruto produzido pela cana-de-açúcar a uma temperatura do ar de 23°C de acordo com o mesmo autor.

Tabela 3 - Radiação extraterrestre (Q_o) em ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}$) no décimo quinto dia de cada mês

Latitude Sul	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
20°	1023	976	892	764	663	587	607	698	822	939	982	1027
22°	1031	976	882	746	638	561	582	677	808	935	987	1038
24°	1039	975	872	726	613	534	556	655	793	929	991	1047

Tabela 4 - Duração máxima diária da insolação (N) em horas no décimo quinto dia de cada mês

Latitude Sul	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
20°	13,2	12,8	12,2	11,6	11,2	10,9	11	11,4	12	12,5	13,2	13,3
22°	13,4	12,8	12,2	11,6	11,1	10,8	10,9	11,3	12	12,6	13,2	13,5
24°	13,5	12,9	12,3	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,6	13,3	13,6

2.6.3.3.3 Determinação da produção bruta de carboidratos não corrigida

De acordo com Van Heemst (1986) a produção máxima de carboidratos é dada pela expressão:

$$CB_{\max} = n.[F.CB_n + (1 - F).CB_c] \quad (17)$$

sendo:

CB_{\max} = produção total de carboidratos não corrigida ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mês}^{-1}$),

n = número de dias do período,

F = fração do dia que foi nublado,

$(1-F)$ = fração do dia foi claro (sem nuvens),

CB_n = carboidrato produzido em um dia completamente nublado ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}$),

CB_c = carboidrato produzido em um dia completamente limpo ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}$).

Para Van Heemst (1986) a fração do dia que foi nublada é conceitualmente a energia interceptada pelas nuvens dividida pela máxima interceptação possível, ou seja:

$$F = \text{Energia interceptada} / \text{Máxima energia interceptada possível} = 0,8.Q_o - Q_g / 0,8.Q_o - 0,2.(0,8.Q_o) \quad (18)$$

onde:

Q_o = radiação no topo da atmosfera ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}$),

Q_g = radiação global ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}$),

0,8 e 0,2 são as frações de Q_o transmitidas em um dia completamente limpo e num dia completamente nublado respectivamente.

Na falta de informação sobre o Q_o medido, Barbieri (1993) estimou a fração F utilizando a equação de Angstron onde:

$$Q_g = Q_o \cdot \left(A + B \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (19)$$

Substituindo (19) em (18) teremos:

$$F = 1,25 - 1,56 \left(A + B \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (20)$$

sendo A e B constantes dependentes do local de estudo, 0,26 e 0,51 para Piracicaba - SP respectivamente.

2.6.3.3.4 Correção da produção bruta de carboidratos

2.6.3.3.4.1 Correção devido ao índice de área foliar ($C_{(IAF)}$)

A correção do IAF é obtida através da equação (21) e se faz necessária porque o CB_{max} foi determinado para um IAF máximo só ocorrendo em uma fase do ciclo (BARBIERI, 1993).

$$C_{(IAF)} = \frac{CB_{(IAF0-5)}}{CB_{(IAF=5)}} \quad (21)$$

Considerando os valores de $CB_{(IAF)}$ para IAF variando de 0 a 5 e substituindo na equação (12) e $CB_{(IAF)}$ para IAF igual a 5 e aplicando na equação (21), resultam na seguinte função de correção dependente dos valores do IAF observados ao longo do ciclo.

$$C_{(IAF)} = \left[\ln \left(\frac{1,23309}{1 + 0,23309 \cdot e^{-0,58 \cdot (IAF)}} \right) \right] \cdot 5,05 \quad (22)$$

Na obtenção dos valores do IAF ao longo do ciclo de cana-planta e soca, Teruel (1995) correlacionou o déficit de crescimento do IAF com a evapotranspiração relativa, isto é Etr/Etm , da seguinte forma:

$$(1 - \text{déficit de crescimento do IAF}) = k_{IAF} \cdot (1 - Etr/Etm) \quad (23)$$

onde:

k_{IAF} = coeficiente de correção variável com a somatória calórica. De 200 a 400 GD, $k_{IAF} = 4,44$; de 400 a 600 GD, $k_{IAF} = 7,36$; de 600 a 800 GD, $k_{IAF} = 3,91$.

$$\text{Déficit de crescimento do IAF} = \frac{IAF_{Niat} - IAF_{Niant}}{IAF_{Pat} - IAF_{Niant}} \quad (24)$$

onde:

IAF_{Niat} = IAF com déficit hídrico no final da fase considerada,

IAF_{Niant} = IAF com déficit hídrico no fim da fase anterior,

IAF_{Pat} = IAF na fase considerada partindo do IAF_{Niant} .

Entretanto, usou-se neste trabalho apenas a relação do IAF com os graus-dia acumulados na simulação dos anos, excluindo o déficit de crescimento por existir diferenças varietais.

2.6.3.3.4.2 Correção devido à temperatura do ar $C_c(t)$ e $C_n(t)$

Através dos dados apresentados por Bull (1967) e modelados por Barbieri (1993), as equações para correção da temperatura do ar são:

$$C_c(t) = -0,774 + 0,0887.t(^{\circ}C) \quad (25)$$

Considerou-se como valor de referência o obtido a temperatura do ar de 20°C.

onde:

$$C_c(20) = 1,$$

$C_c(t)$ = correção do carboidrato bruto à temperatura observada (dias claros).

$$C_n(t) = -0,636 + 0,0729.t(^{\circ}C) \quad (26)$$

onde:

$$C_n(20) = 0,82;$$

$C_n(t)$ = correção do carboidrato bruto à temperatura observada (dias nublados).

2.6.3.3.4.3 Correção devido à idade da cultura $C(i)$

Considerando as medidas fotossintéticas feitas por Hartt e Burr (1967) ao longo de um ciclo da cultura, fez-se a correção em função da idade da cultura relacionando com os graus-dia sendo:

$$C(i) = 1,1166.e^{-0,0006.\sum GD}; R^2 = 0,9525 \quad (27)$$

onde:

$C(i)$ = correção devido à idade da planta,

$\sum GD$ = somatório dos graus-dia com $T_b = 20^{\circ}C$,

esta equação tem valor igual a 1 para os valores de $\sum GD < 140$ e igual a 0,4 para valores de $\sum GD > 1700$.

2.6.3.3.4.4 Respiração de crescimento (C_{rc})

Com os valores apresentados por Machado (1981) na Tabela 1, são necessários 1,27 g de carboidrato fotossintetizado para produzir 1 g de matéria seca. Assim, a correção da respiração de crescimento é dada pela seguinte constante:

$$C_{rc} = 0,79 \quad (28)$$

onde:

C_{rc} = correção devido à respiração de crescimento.

2.6.3.3.4.5 Respiração de manutenção (C_{rm})

A respiração de manutenção ocorre devido ao consumo de energia na manutenção dos processos fisiológicos vitais da planta. A correção da respiração é multiplicativa e expressa pela equação (29) de acordo com Barbieri (1993):

$$C_{rm} = 1 - r_{max} \cdot C_{r(t)} \cdot C_{r(i)} \quad (29)$$

onde:

C_{rm} = correção devido à respiração de manutenção,

r_{max} = valor máximo da respiração (30°C) = 2,3 mg de CH_2O .g de m.s.⁻¹,

$C_{r(t)}$ = correção da respiração de manutenção devido à temperatura,

$C_{r(i)}$ = correção da respiração de manutenção devido à idade.

O valor de r_{max} foi obtido baseando-se nos resultados de Medina; San Jose e Sequera (1970) sendo apresentado por Barbieri (1993). Os valores de correção da respiração de manutenção devido à temperatura $C_{r(t)}$ e à idade $C_{r(i)}$ também foram obtidos dos resultados de Medina; San Jose e Sequera (1970) e apresentados nas equações (30) e (31):

$$C_{r(t)} = e^{-4,11+0,1383.t(^{\circ}\text{C})} \quad (30)$$

para valores $t > 30^{\circ}\text{C}$, considera-se $C_{r(t)} = 1$.

$$C_{r(i)} = 1,25.0,9994^{(\sum GD)} \quad (31)$$

para valores $\sum GD < 372$ considera-se $C_{r(i)} = 1$.

2.6.3.3.4.6 Correção devido à disponibilidade hídrica (C_{dh})

A correção devido à disponibilidade hídrica foi feita utilizando o modelo proposto por Jensen (1968) e o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (λ_i) para cada fase considerada (DELGADO ROJAS, 1998).

$$Ya_a = Ym_a \cdot \left(\frac{ETr}{ETm}\right)_1^{0,49} \cdot \left(\frac{ETr}{ETm}\right)_2^{0,27} \cdot \left(\frac{ETr}{ETm}\right)_3^{0,08} \quad (32)$$

em que:

ETr e ETm correspondem a evapotranspiração real e máxima,

Ya_a e Ym_a são as produtividades atual e máxima de açúcar,

1, 2 e 3 correspondem as seguintes fases respectivamente: brotação e estabelecimento, desenvolvimento vegetativo e maturação.

2.6.3.3.4.7 Correção devido ao florescimento (C_f)

A indução ao florescimento ocorre em condições particulares de fotoperíodo entre 25 de fevereiro a 20 de março na latitude de 22°S. A equação (33) que indica se houve ou não indução foi feita considerando a variedade NA 56-79 (PEREIRA; BARBIERI; MANIERO, 1986) e aplicou-se nas variedades floríferas que apresentam “isoporização”.

$$L = 1,212 - 0,07508.X1 - 0,01463.X2 \quad (33)$$

onde:

$L > 0$, indica não-florescimento,

$L = 0$, indica 50% de probabilidade de florescer,

$L < 0$, indica florescimento,

$X1$ = número de noites com temperatura mínima $\geq 18^\circ\text{C}$,

$X2$ = número de dias com temperatura máxima $\leq 31^\circ\text{C}$.

A perda de sacarose em decorrência do florescimento foi feita utilizando o potencial da variedade NA 56-79 com dados de Iaia et al. (1985). Entretanto, existe diferença entre a intensidade do florescimento e entre as variedades, sendo entendido que a modelagem do florescimento necessita de maiores subsídios, pois cada variedade apresenta um determinado comportamento (IAIA et al., 1985). Na Figura 12, observamos que quanto mais tempo ficar no campo, maiores são as perdas. Considerou-se o início da contagem dos graus-dia em 25 de fevereiro de cada ano.

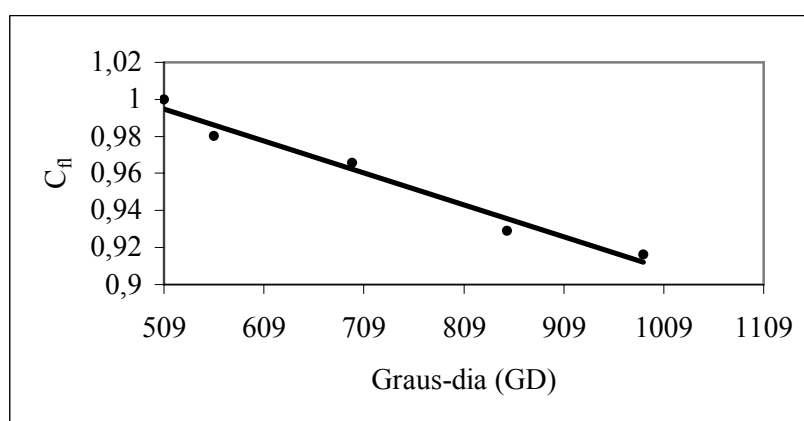


Figura 12 - Correção devido ao florescimento em função dos graus-dia acumulados

$$C_f = -0,0002.GD + 1,0827 \quad R^2 = 0,9729 \quad (34)$$

onde:

C_{fl} = correção devido ao florescimento,

GD = graus-dia acumulados ($T_b = 20^\circ\text{C}$).

2.6.3.4 Partição dos fotoassimilados

A partição dos fotoassimilados (Figura 13) é feita de acordo com Liu e Bull (2001) e em função da temperatura média do ar. A distinção entre as fases fenológicas foi feita pelo fator graus-dia negativos, iniciando a maturação com temperaturas mínimas diárias abaixo de 20°C .

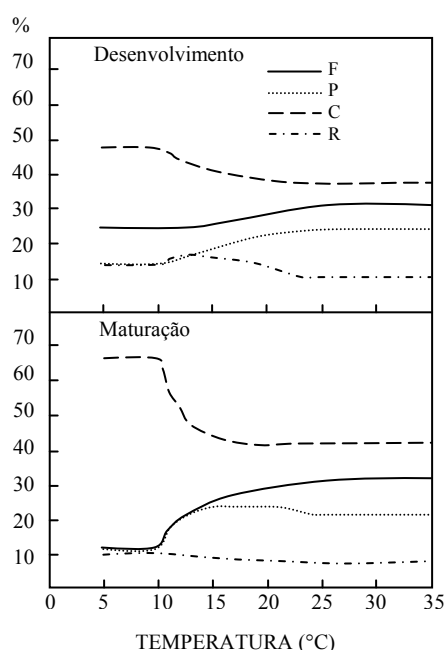


Figura 13 - Partição dos fotoassimilados de acordo com a temperatura média do ar no desenvolvimento e maturação onde C (colmo), R (raiz), F (folha) e P (ponta). Adaptado de Liu e Bull (2001)

2.6.4 Planejamento estratégico

O planejamento otimizado da colheita utilizando o programa computacional GAMS “General Algebraic Modeling System” (BROOKE et al., 1998) é dado em função da produtividade das áreas homogêneas; dos meses de colheita; da distância das áreas até a usina; dos ambientes das áreas produtoras; caminhões para transporte; da capacidade mensal de corte, carregamento e transporte; do preço mensal do açúcar e álcool e dos custos fixos e variáveis industriais e agrícolas sendo:

$$MAX Z = RECEITA - CUSTOS DE PRODUÇÃO \quad (35)$$

Sujeito a:

CAPACIDADE DE CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE

2.6.5 Forma de análise dos resultados

O modelo proposto é definido por uma expressão matemática que relaciona a variável dependente ATR - Açúcar Total Recuperável com as variáveis independentes definidas como graus-dia negativos, armazenamento disponível e partição dos fotoassimilados para o colmo da seguinte forma:

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots + b_n X_n + \varepsilon \quad (36)$$

onde:

Y = variável dependente do modelo,

X_1, X_2, \dots, X_n = variáveis independentes do modelo no decêndio,

ε = erro associado ao modelo.

A determinação dos coeficientes angulares b_1, b_2, \dots, b_n da equação foi feita utilizando o procedimento "REG" pelo método "STEPWISE" onde este seleciona as variáveis independentes de maior significância que entrarão no modelo através da regressão linear múltipla (ROBBINS; DANEMAN, 1999). Em todos os procedimentos, a análise de variância da regressão linear múltipla foi testada com o teste F (SPIEGEL, 1972) até o nível de 10% de probabilidade de erro na rejeição da hipótese nula. Este nível é utilizado normalmente em trabalhos de regressão com variáveis aleatórias (HOFFMAN; VIEIRA, 1977). Como indicador da precisão dos modelos, utilizou-se o parâmetro denominado de coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (1981) e a raiz do quadrado médio do resíduo (Raiz QMRes.).

O modelo otimizado do planejamento agrícola da colheita utilizou as previsões de produção das áreas homogêneas e os componentes da cadeia produtiva semelhante ao desenvolvido por Salassi, Breaux e Naquin (2002).

2.7 Resultados e discussão

A evolução temporal e a distribuição espacial do IAF das áreas podem ser vista na Figura 14 e nos Anexos A até D, respectivamente. As avaliações foram feitas de 29/04/2003 a 15/10/2004 na variedade RB 85 5156 e de 02/07/2003 a 15/10/2004 na variedade SP 80-3280, resultado de amostragens com intervalo de dois meses aproximadamente. Observando os Anexos A e C na área da variedade RB 85 5156, tem-se claramente o maior IAF na parte médio-baixa da área onde ocorre maior acúmulo de água. Pode-se inferir desse modo que na parte alta a cana-de-açúcar sofre um maior déficit hídrico, maior senescência, tendo um menor rendimento em colmos, entrando em maturação mais precocemente que na parte baixa, conforme se confirma no Anexo E através da análise do Brix. Nos Anexos A ao D na área da variedade SP 80-3280, a variabilidade espacial do IAF é pequena, indicando que em áreas mais planas este fator varia pouco, tendendo o IAF também ser maior na parte mais baixa da área.

Para constatar a variabilidade espacial do Brix, avaliou-se no dia 29/04/2004 este fator, sendo que nas partes mais baixas da área da RB 85 5156 o teor de sólidos solúveis foi menor devido ao acúmulo de água interferindo na maturação das plantas. Na área da SP 80-3280 por ser mais plana houve menor variação espacial do Brix (Anexo E) em relação à área da RB 85 5156, apesar de encontrar valores menores do Brix em locais com maior disponibilidade hídrica.

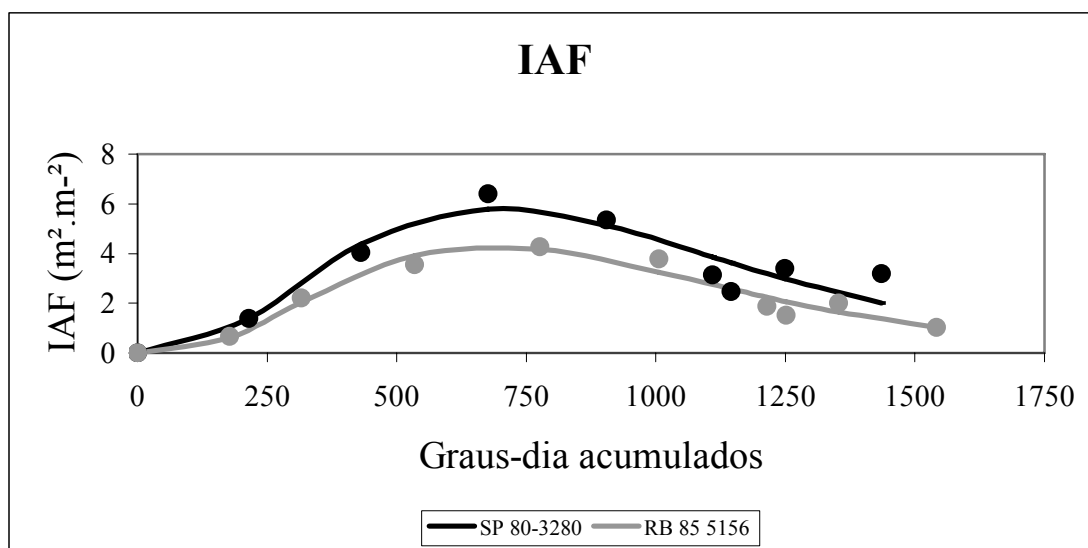


Figura 14 - Evolução temporal do IAF em 2003 e 2004 para calibração do modelo ($T_b = 20^\circ\text{C}$)

Para o ajuste da evolução temporal do IAF utilizou-se a metodologia apresentada por Teruel, Barbieri e Ferraro Junior (1997), onde os parâmetros foram obtidos pelo procedimento não linear do SAS (SAS INSTITUTE, 1989) utilizando o método de Gauss-Newton. Nos demais anos, o IAF foi estimado utilizando as equações (37) e (38) através dos graus-dia acumulados no período conforme apresentado na Tabela 5.

$$IAF_{SP80-3280} = e^{-14,9457} * GD^{3,0187} * e^{(-0,00439*GD)} \quad (37)$$

$$IAF_{RB855156} = e^{-16,31} * GD^{3,2149} * e^{(-0,00471*GD)} \quad (38)$$

Analisando a evolução temporal do IAF (Figura 14), maiores valores são encontrados na variedade SP 80-3280 em quase todo o período da amostragem. A vantagem está no fato da área foliar individual ser maior já que o número de folhas verdes é semelhante nas duas variedades. Observações de campo também indicam folhas mais eretas principalmente no topo do dossel desta variedade. Isto explica o fato da SP 80-3280 ter um rápido fechamento da entrelinha tendo um melhor desenvolvimento do dossel, maior interceptação da radiação solar e maior teor de sacarose após julho (Figura 15). Observações semelhantes foram feitas por Sinclair et al. (2004) estudando algumas variedades de Canal Point onde o número de folhas verdes era semelhante, entretanto a área foliar individual variava.

O início do declínio das curvas do IAF observado em ambas as variedades a partir dos 750 graus-dia acumulados no ciclo indicam queda na área foliar e na eficiência de crescimento principalmente pelo aumento da taxa respiratória. Esse desequilíbrio entre a taxa fotossintética e a respiratória é atribuído à idade da planta (MEDINA; SAN JOSE; SEQUERA, 1970). Recentes trabalhos indicam que este declínio também pode estar relacionado à limitação no transporte de água e sais para a planta.

As curvas de maturação das variedades são encontradas na Figura 15. Constata-se a precocidade da variedade RB 85 5156 e a maturação média a tardia da variedade SP 80-3280 conforme descrito pela Universidade Federal de São Carlos (2004) e COPERSUCAR (1997).

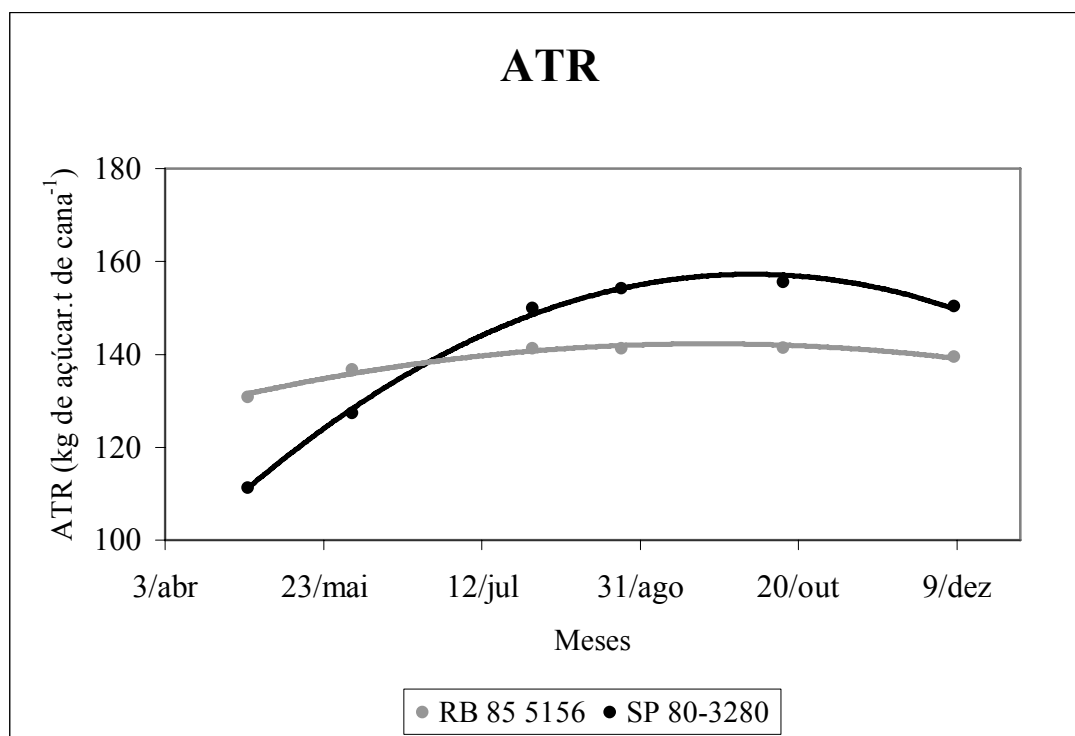


Figura 15 - Evolução temporal do ATR no ano de 2004 para a calibração do modelo

Os resultados nos decêndios anteriores à colheita dos fatores partição de fotoassimilados para o colmo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), graus-dia negativos ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$) e armazenamento de água no solo (mm) bem como valores diários da ETa/ETm ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$), da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), do IAF ($\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$), da radiação global ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dia}$), da insolação ($\text{h}\cdot\text{dia}^{-1}$), do carboidrato máximo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$), das correções e partições (valores de 0 a 1), dos graus-dia ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$) e profundidade de raízes (cm) são apresentados nas Tabelas 5 a 7. Como exemplo utilizou-se a data de colheita 20/06/1999 com corte anterior no mês 06/1998.

Tabela 5 - Cálculo do IAF em função dos graus-dia acumulados

ANO	DIA	MÊS	ETa/ETm (mm)	Temperatura	Temperatura	Temperatura	GDP Tb = 20	f	GDC	Σ GDC	IAF	IAF
				Máxima	Mínima	Média					SP 80-3280	RB 85 5156
1998	1	JUN	0,837	24,2	8,8	16,5	0,573	0,9	0,515	0,515	0,00	0,00
1998	2	JUN	0,837	24,3	10,0	17,2	0,647	0,9	0,582	1,097	0,00	0,00
1998	3	JUN	0,837	24,3	9,5	16,9	0,625	0,9	0,562	1,660	0,00	0,00
1998	4	JUN	0,837	23,6	8,7	16,2	0,435	0,9	0,391	2,051	0,00	0,00
1998	5	JUN	0,837	22,7	8,7	15,7	0,260	0,9	0,234	2,285	0,00	0,00
1998	6	JUN	0,837	24,7	8,1	16,4	0,665	0,9	0,599	2,884	0,00	0,00
1998	7	JUN	0,837	24,7	9,1	16,9	0,708	0,9	0,637	3,521	0,00	0,00
1998	8	JUN	0,837	24,8	7,0	15,9	0,647	0,9	0,582	4,104	0,00	0,00
1998	9	JUN	0,837	25,1	7,2	16,2	0,727	0,9	0,654	4,758	0,00	0,00
1998	10	JUN	0,837	27,1	8,5	17,8	1,355	0,9	1,220	5,977	0,00	0,00
...
1998	1	NOV	0,64575	26,8	14,2	20,5	1,835	1,100	2,018	284,303	2,37	1,67
1998	2	NOV	0,64575	26,8	14,1	20,5	1,820	1,100	2,003	286,306	2,40	1,70
1998	3	NOV	0,64575	25,2	14,8	20,0	1,300	1,100	1,430	287,736	2,42	1,71
1998	4	NOV	0,64575	29,5	12,2	20,9	2,608	1,100	2,869	290,605	2,46	1,74
1998	5	NOV	0,64575	32,3	16,0	24,2	4,641	1,100	5,105	295,710	2,54	1,80
1998	6	NOV	0,64575	32,9	17,0	25,0	5,233	1,100	5,756	301,466	2,62	1,86
1998	7	NOV	0,64575	32,9	16,4	24,7	5,043	1,100	5,547	307,013	2,70	1,93
1998	8	NOV	0,64575	31,9	18,5	25,2	5,284	1,100	5,812	312,826	2,79	1,99
1998	9	NOV	0,64575	31,9	17,6	24,8	4,951	1,100	5,447	318,272	2,87	2,05
1998	10	NOV	0,64575	23,6	17,6	20,6	1,080	1,100	1,188	319,460	2,89	2,06
...
1999	16	JAN	1	28,2	20,6	24,4	4,400	1,117	4,913	652,859	5,77	4,27
1999	17	JAN	1	28,0	20,6	24,3	4,300	1,117	4,802	657,661	5,78	4,28
1999	18	JAN	1	34,0	19,9	27,0	6,950	1,117	7,761	665,422	5,79	4,28
1999	19	JAN	1	35,9	20,4	28,2	8,150	1,117	9,101	674,523	5,79	4,28
1999	20	JAN	1	36,4	20,2	28,3	8,300	1,117	9,268	683,791	5,80	4,28
1999	21	JAN	1	36,1	20,6	28,4	8,350	1,117	9,324	693,115	5,80	4,28
1999	22	JAN	1	35,1	20,8	28,0	7,950	1,117	8,878	701,993	5,79	4,28
1999	23	JAN	1	33,5	20,2	26,9	6,850	1,117	7,649	709,642	5,79	4,27
...
1999	7	JUN	0,658	22,9	9,3	16,1	0,309	0,9	0,278	1223,767	3,14	2,19
1999	8	JUN	0,658	26,1	11,3	18,7	1,257	0,9	1,131	1224,899	3,13	2,18
1999	9	JUN	0,658	27,1	11,6	19,4	1,626	0,9	1,464	1226,362	3,12	2,18
1999	10	JUN	0,658	24,5	12,9	18,7	0,873	0,9	0,786	1227,148	3,12	2,17
1999	11	JUN	1,000	24,9	15,0	20,0	1,213	0,9	1,091	1228,239	3,11	2,17
1999	12	JUN	1,000	23,4	9,4	16,4	0,413	0,9	0,372	1228,611	3,11	2,17
1999	13	JUN	1,000	22,8	13,7	18,3	0,431	0,9	0,388	1228,998	3,11	2,16
1999	14	JUN	1,000	17,4	12,5	15,0	0,690	0,9	0,621	1229,619	3,10	2,16
1999	15	JUN	1,000	22,4	13,6	18,0	0,327	0,9	0,295	1229,914	3,10	2,16
1999	16	JUN	1,000	19,4	11,6	15,5	0,023	0,9	0,021	1229,935	3,10	2,16
1999	17	JUN	1,000	24,7	10,4	17,6	0,772	0,9	0,695	1230,630	3,10	2,16
1999	18	JUN	1,000	27,3	10,9	19,1	1,625	0,9	1,462	1232,092	3,09	2,15
1999	19	JUN	1,000	23,1	11,7	17,4	0,421	0,9	0,379	1232,471	3,09	2,15
1999	20	JUN	1,000	15,9	14,1	15,0	4,669	0,9	4,203	1236,674	3,06	2,13

Tabela 6a - Cálculo dos fotoassimilados acumulados no colmo

insolação (h.dia ⁻¹)	nuvens (h.dia ⁻¹)	1-F		a b k			Qo (cal.cm ⁻² .dia)	N (h.dia ⁻¹)	CBc CBn CB max.		
		fra. claro	fra. nublado	constantes					(kg.ha ⁻¹ .dia ⁻¹)		
8,4	2,4	0,778	0,222	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,574	251,853	538,636
8,5	2,3	0,787	0,213	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,574	251,853	542,050
7,4	3,4	0,685	0,315	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,574	251,853	504,495
7,3	3,5	0,676	0,324	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,574	251,853	501,081
9,3	1,5	0,861	0,139	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,574	251,853	569,363
8,9	1,9	0,824	0,176	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,574	251,853	555,707
9,6	1,2	0,889	0,111	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,575	251,853	579,606
9,0	1,8	0,833	0,167	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,575	251,853	559,122
9,0	1,8	0,833	0,167	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,576	251,853	559,122
9,0	1,8	0,833	0,167	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	620,578	251,854	559,124
...
5,5	7,7	0,417	0,583	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1134,615	464,632	743,792
8,5	4,7	0,644	0,356	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1135,911	465,082	897,055
2,8	10,4	0,212	0,788	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1136,830	465,401	607,825
5,2	8	0,394	0,606	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1138,653	466,034	731,005
10,8	2,4	0,818	0,182	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1141,834	467,136	1019,162
10,4	2,8	0,788	0,212	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1145,321	468,344	1001,720
8,9	4,3	0,674	0,326	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1148,581	469,473	927,356
4,8	8,4	0,364	0,636	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1151,890	470,617	718,353
9,6	3,6	0,727	0,273	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1154,892	471,654	968,554
0,0	13,2	0,000	1,000	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1155,534	471,875	471,875
5,5	7,7	0,417	0,583	0,0619	0,261	0,58	987	13,2	1134,615	464,632	743,792
...
3,1	10,3	0,231	0,769	0,0619	0,261	0,58	1031	13,4	1269,219	514,872	689,385
1,9	11,5	0,142	0,858	0,0619	0,261	0,58	1031	13,4	1269,284	514,894	621,860
6,1	7,3	0,455	0,545	0,0619	0,261	0,58	1031	13,4	1269,364	514,921	858,362
11,1	2,3	0,828	0,172	0,0619	0,261	0,58	1031	13,4	1269,420	514,940	1139,919
10,2	3,2	0,761	0,239	0,0619	0,261	0,58	1031	13,4	1269,435	514,945	1089,258
10,7	2,7	0,799	0,201	0,0619	0,261	0,58	1031	13,4	1269,409	514,936	1117,388
11,0	2,4	0,821	0,179	0,0619	0,261	0,58	1031	13,4	1269,347	514,915	1134,225
8,8	4,6	0,657	0,343	0,0619	0,261	0,58	1031	13,4	1269,266	514,888	1010,300
...
6,8	4	0,630	0,370	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,696	282,892	552,880
8,6	2,2	0,796	0,204	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,616	282,865	624,278
9,6	1,2	0,889	0,111	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,512	282,831	663,881
3,4	7,4	0,315	0,685	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,456	282,812	417,755
7,7	3,1	0,713	0,287	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,378	282,786	588,356
2,5	8,3	0,231	0,769	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,351	282,777	381,984
6,7	4,1	0,620	0,380	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,324	282,768	548,631
0,0	10,8	0,000	1,000	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,279	282,753	282,753
4,2	6,6	0,389	0,611	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,258	282,746	449,390
2,2	8,6	0,204	0,796	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,257	282,746	370,035
5,6	5,2	0,519	0,481	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,207	282,729	504,903
6,1	4,7	0,565	0,435	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,101	282,694	524,665
3,7	7,1	0,343	0,657	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	711,074	282,685	429,448
0,0	10,8	0,000	1,000	0,0619	0,261	0,58	561	10,8	710,769	282,583	282,583

Tabela 6b - Continuação do cálculo dos fotoassimilados acumulados no colmo

IAF	Correção							Floresc.	Partição colmo	Carboidratos colmo (kg.ha ⁻¹)	Carboidratos Σ decênio (kg.ha ⁻¹)
	Temp. ar claro	Temp. ar nublado	Idade	Resp. cresc.	Resp. manute. temperatura idade		Disp. hídrica				
0,000	0,690	0,567	1,000	0,79	0,161	1,000	0,861		0,617	0,000	
0,000	0,747	0,614	1,000	0,79	0,176	1,000	0,861		0,575	0,000	
0,000	0,725	0,596	1,000	0,79	0,170	1,000	0,861		0,590	0,000	
0,000	0,659	0,541	1,000	0,79	0,153	1,000	0,861		0,642	0,000	
0,000	0,619	0,509	1,000	0,79	0,144	1,000	0,861		0,680	0,000	
0,000	0,681	0,560	1,000	0,79	0,159	1,000	0,861		0,624	0,000	
0,000	0,725	0,596	1,000	0,79	0,170	1,000	0,861		0,590	0,000	
0,000	0,636	0,523	1,000	0,79	0,148	1,000	0,861		0,663	0,000	
0,000	0,659	0,541	1,000	0,79	0,153	1,000	0,861		0,642	0,000	
0,000	0,805	0,662	1,000	0,79	0,192	1,000	0,861		0,540	0,001	0,001
...
0,631	1,044	0,858	0,941	0,79	0,279	1,000	0,717214005		0,441	27,628	
0,636	1,040	0,855	0,940	0,79	0,278	1,000	0,717214005		0,442	33,147	
0,640	1,000	0,822	0,940	0,79	0,261	1,000	0,717214005		0,455	20,190	
0,647	1,075	0,884	0,938	0,79	0,293	1,000	0,717214005		0,431	30,231	
0,660	1,368	1,125	0,935	0,79	0,463	1,000	0,717214005		0,367	93,142	
0,674	1,439	1,183	0,932	0,79	0,517	1,000	0,717214005		0,356	111,651	
0,687	1,412	1,161	0,929	0,79	0,496	1,000	0,717214005		0,360	98,141	
0,700	1,461	1,201	0,926	0,79	0,535	1,000	0,717214005		0,353	87,374	
0,712	1,421	1,168	0,922	0,79	0,503	1,000	0,717214005		0,359	107,932	
0,714	1,053	0,866	0,922	0,79	0,283	1,000	0,717214005		0,438	19,918	629,354
...
0,960	1,390	1,143	0,755	0,79	0,479	0,845	1		0,215	54,543	
0,960	1,381	1,135	0,753	0,79	0,473	0,842	1		0,218	48,347	
0,961	1,616	1,329	0,749	0,79	0,682	0,838	1		0,139	83,356	
0,961	1,723	1,416	0,745	0,79	0,805	0,834	1		0,107	112,596	
0,961	1,736	1,427	0,741	0,79	0,822	0,829	1		0,103	106,258	709,522
0,961	1,741	1,431	0,737	0,79	0,828	0,825	1		0,101	107,698	
0,961	1,705	1,402	0,733	0,79	0,783	0,820	1		0,112	108,370	
0,960	1,608	1,321	0,729	0,79	0,673	0,816	1		0,142	92,546	
...
0,871	0,654	0,538	0,536	0,79	0,152	0,600	0,703	1	0,646	2,972	
0,870	0,885	0,727	0,535	0,79	0,218	0,599	0,703	1	0,500	6,791	
0,869	0,942	0,775	0,535	0,79	0,238	0,599	0,703	1	0,476	8,507	
0,869	0,885	0,727	0,535	0,79	0,218	0,598	0,703	1	0,500	4,525	43,419
0,868	0,996	0,818	0,534	0,79	0,259	0,598	1	1	0,456	12,421	
0,868	0,681	0,560	0,534	0,79	0,159	0,598	1	1	0,624	3,151	
0,868	0,845	0,694	0,534	0,79	0,205	0,598	1	1	0,519	7,486	
0,867	0,552	0,454	0,534	0,79	0,130	0,598	1	1	0,756	1,518	
0,867	0,823	0,676	0,534	0,79	0,198	0,597	1	1	0,531	5,730	
0,867	0,601	0,494	0,534	0,79	0,140	0,597	1	1	0,698	2,345	
0,867	0,783	0,643	0,534	0,79	0,186	0,597	1	1	0,553	5,700	
0,866	0,920	0,756	0,533	0,79	0,230	0,597	1	1	0,485	8,870	
0,865	0,769	0,632	0,533	0,79	0,182	0,597	1	1	0,561	4,639	
0,863	0,557	0,458	0,532	0,79	0,131	0,595	1	1	0,750	1,520	53,380

Tabela 7 - Cálculo dos graus-dia negativos, profundidade de raízes e armazenamento de água

GDN	Graus-dia negativos	GDP	f	GDC	ΣGDC	Profundidade	Armazenamento água no solo
Tb = 20	Σ decênio (°C)	Tb = 10				Raízes (cm)	Σ decênio (mm)
5,430		6,547	0,900	5,892	5,892	1,735	
4,662		7,150	0,900	6,435	12,327	3,606	
4,966		6,908	0,900	6,218	18,545	5,393	
5,713		6,207	0,900	5,586	24,131	6,979	
6,080		5,760	0,900	5,184	29,315	8,436	
5,687		6,509	0,900	5,858	35,173	10,065	
5,077		6,926	0,900	6,233	41,406	11,779	
-0,470		6,153	0,900	5,538	46,944	13,284	
6,102		6,369	0,900	5,732	52,676	14,826	
4,740	47,832	7,860	0,900	7,074	59,750	16,706	20,000
...
1,780		10,500	1,100	11,550	1480,665	177,787	
1,827		10,450	1,100	11,495	1492,160	178,344	
1,733		10,000	1,100	11,000	1503,160	178,873	
2,345		10,850	1,100	11,935	1515,095	179,441	
0,654		14,150	1,100	15,565	1530,660	180,173	
0,377		14,950	1,100	16,445	1547,105	180,938	
0,524		14,650	1,100	16,115	1563,220	181,677	
0,112		15,200	1,100	16,720	1579,940	182,435	
0,269		14,750	1,100	16,225	1596,165	183,161	
0,640	10,261	10,600	1,100	11,660	1607,825	183,677	15,800
...
0,000		14,400	1,117	16,080	2673,439	217,052	
0,000		14,300	1,117	15,968	2689,407	217,406	
0,000		16,950	1,117	18,928	2708,335	217,821	
0,000		18,150	1,117	20,268	2728,602	218,261	
0,000	0,031	18,300	1,117	20,435	2749,037	218,701	50,000
0,000		18,350	1,117	20,491	2769,528	219,136	
0,000		17,950	1,117	20,044	2789,572	219,558	
0,000		16,850	1,117	18,816	2808,388	219,949	
...
5,612		6,118	0,900	5,506	4516,900	244,397	
3,409		8,700	0,900	7,830	4524,730	244,475	
3,035		9,350	0,900	8,415	4533,145	244,558	
2,897	34,928	8,700	0,900	7,830	4540,975	244,634	6,800
1,684		9,950	0,900	8,955	4549,930	244,722	
5,350		6,413	0,900	5,772	4555,702	244,778	
2,908		8,250	0,900	7,425	4563,127	244,851	
7,653		4,950	0,900	4,455	4567,582	244,894	
3,103		8,000	0,900	7,200	4574,782	244,964	
6,031		5,500	0,900	4,950	4579,732	245,012	
4,297		7,550	0,900	6,795	4586,527	245,077	
3,366		9,100	0,900	8,190	4594,717	245,156	
4,029		7,400	0,900	6,660	4601,377	245,220	
12,893	51,313	5,000	0,900	4,500	4605,877	245,263	45,100

Analisando a Tabela 5 verificamos que com o cálculo diário dos graus-dia e em função desse parâmetro, o modelo fornece os valores do IAF diário das variedades SP 80-3280 e RB 85 5156 utilizadas na simulação. Como o IAF não foi medido para as outras variedades, procurou-se relacionar com as variedades calibradas. Assim, os valores do IAF da variedade SP 80-3280 foram usados na SP 80-1842 e SP 81-3250, e os valores da RB 85 5156 nas variedades RB 72 454 e RB 85 5536. Entretanto, a relação E_t/E_m não foi utilizada na modelagem do IAF por não medirmos o IAF potencial das variedades nas áreas experimentais.

Sabendo o valor correto do coeficiente de extinção (k) de cada variedade (Tabela 6a) podemos estimar o valor crítico do IAF considerando a interceptação de 95% da PAR incidente no topo do dossel. Como exemplo, utilizou-se $k = 0,58$ sendo o valor esperado do IAF acima de 4 (BARBIERI, 1993; INMAN-BAMBER, 1994).

$$IAF = \ln(I_o/I^*I_o)/k = \ln[0,95/(0,05*0,95)]/0,58 = 5,16 \quad (39)$$

Quando o IAF atinge este valor de 5,16 é denominado de IAF crítico (RHODES, 1973) e apenas 5% da radiação incidente atingem o solo. Com o resultado obtido da equação (39), verificamos que o valor de $k = 0,58$ é baixo para ser aplicado na modelagem da variedade RB 85 5156 e alto para modelar a variedade SP 80-3280 por apresentar um IAF maior que 5,16. Utilizando o máximo valor do IAF obtido na amostragem da variedade SP 80-3280 que é 6,41; tem-se um valor empírico de $k = 0,467$ indicativo de folhas mais verticais e melhor aproveitamento da radiação nas folhas baixas. Observações de campo indicam que o coeficiente de extinção também varia com o desenvolvimento; inicialmente um valor baixo em torno de 0,47 e próximo ao pico do IAF um valor de 0,58 (ZHOU; SINGELS; SMIT, 2003). Em função da elevação solar e do ângulo foliar, Goudriaan (1988) usou uma aproximação para o cálculo diário da variação do coeficiente de extinção. Simulando um coeficiente de extinção menor que 0,58 no modelo PREDPOL, têm-se um aumento na quantidade de sacarose acumulada principalmente pelo aumento da radiação interceptada e do IAF.

Simular o dossel das plantas considerando um meio homogêneo pode trazer erros no cálculo da radiação interceptada, pois a própria natureza do dossel é heterogênea. Birch et al. (2003) apontam como solução simular o desenvolvimento das plantas utilizando as três dimensões do plano através de modelos tridimensionais (MUETZELFELDT; MASSHEDER, 2003), considerando o desenvolvimento de órgãos como folhas e internódios individualmente, compreendendo a dinâmica da extensão vertical e a expansão horizontal das partes da planta e a

ocupação do espaço entre elas. Futuramente, essa simulação tridimensional individual explicará a interação entre planta daninha e cultura ou em sistemas agroflorestais, bem como será utilizada em locais onde a heterogeneidade dos solos é grande, aliada a sistemas de informações geográficas - SIG. Boote e Pickering (1994) também confirmam a heterogeneidade do dossel e desse modo, a simulação da interceptação da radiação considerando a latitude, dia do ano e horário do dia é adequada, principalmente por analisar o efeito da radiação difusa em dias ensolarados e a elevação solar.

Singels; Donaldson e Smit (2005) relatam que o rendimento de sacarose melhoraria aumentando a produção de biomassa e a radiação interceptada. Murchie et al. (1999) estudaram a atividade fotossintética do dossel de arroz caracterizado por folhas eretas semelhantes ao dossel de cana-de-açúcar. Folhas baixas parcialmente sombreadas não apresentaram o verdadeiro teto da taxa fotossintética, mas um valor abaixo do esperado devido à aclimatação decorrente da alta irradiância. Apesar de baixo, a remoção dessas folhas resultou num declínio de 45% na taxa fotossintética diária.

Uma estratégia que vem sendo adotada na melhoria da captação da radiação é atrasar a senescência foliar (THOMAS; HOWARTH, 2000). Entretanto, a tentativa de reter folhas baixas diminuindo a biossíntese de etileno restringiu o aparecimento de folhas novas, não tendo efeito no ganho de biomassa. É necessário desta forma o conhecimento dos efeitos do clima no genótipo, observando a captura da radiação, eficiência fotossintética de todo o dossel, senescência foliar e partição para o colmo. Em consequência desta característica arquitetônica, a taxa fotossintética da cultura responde de forma linear ao aumento da radiação solar e não de forma assintótica como em folhas individuais (GLOVER, 1974).

A conversão da radiação solar em fotossintetizados pode ser quantificada como eficiência fotossintética (g.MJ^{-1}), sendo definida como a sacarose produzida através da fotossíntese total ($\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) pela fração interceptada da PAR ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), excluindo perdas respiratórias (SINGELS; DONALDSON; SMIT, 2005). De acordo com Liu e Bull (2001) isto é fortemente relacionado com a temperatura podendo variar de 2,7 g de CH_2O por MJ da PAR a 10°C a 8,2 g.MJ^{-1} a 20°C . O modelo CANEGRO assume uma fração constante de 5,68 g.MJ^{-1} (SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002).

Na Tabela 6a, visualizamos na última coluna o máximo diário de produção bruta de carboidratos função das constantes a , b e k definidas anteriormente, radiação no topo da

atmosfera (Q_o), duração máxima diária da insolação (N) e a fração claro ou nublado. Com os fatores de correção e partição para o colmo definido na Tabela 6b, temos a quantidade diária de carboidratos no colmo por hectare. Mantendo todos os fatores de correção constantes, quando o IAF é máximo tem-se um maior valor de carboidratos carregados para o colmo, porém como este valor ocorre geralmente na estação quente e úmida, o carboidrato será transformado em açúcares redutores não sendo acumulado na forma de sacarose e sim consumido para o crescimento da planta. Nos tecidos de armazenamento imaturos caracterizados pela expansão celular, a sacarose é rapidamente hidrolisada pela invertase ácida vacuolar e as hexoses produzidas movem-se livremente até o citoplasma para serem utilizadas no processo de crescimento. Os carboidratos só são de fato acumulados em maior intensidade e na forma de sacarose nos tecidos maduros, com o estímulo do abaixamento da temperatura e seca quando a planta entra em maturação (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004b). Na Tabela 7, este fato é confirmado, pois o aumento dos valores de graus-dia negativos inicia geralmente na primeira quinzena de abril juntamente com o déficit hídrico no solo, sendo uma forma simples de relacionar o uso da água e a evapotranspiração com a produtividade (BEZUIDENHOUT et al., 2006; THOMPSON, 1976).

Xin e Browse (2000) relatam que baixas temperaturas tendem a diminuir o potencial hídrico extracelular, promovendo desta forma por osmose a desidratação celular. A saída de água da célula depende da concentração de soluto inicial e da baixa temperatura. Na tentativa de barrar esta saída de água e manter a membrana celular intacta, ocorre o acúmulo de sacarose dentro dos vacúolos diminuindo também o potencial hídrico intracelular. Para Castro (2002), baixas temperaturas afetam o transporte de açúcar e o seu armazenamento, levando a um acúmulo de sacarose nas folhas. O acúmulo de açúcares solúveis durante a aclimatação é documentado em muitas plantas inclusive em *Arabidopsis*, planta modelo utilizada em diversos estudos de mutação e transgenia. Da mesma forma, várias culturas podem suportar o estresse hídrico através do aumento da concentração de soluto nas células (TAIZ; ZEIGER, 1998).

Alexander (1973) explicou que temperaturas noturnas baixas menores que 20°C atuam no metabolismo da planta, limitando a movimentação de nutrientes e água nas folhas ocasionando uma diminuição dos teores desses elementos, afetando o crescimento. Por outro lado Glasziou e Gayler (1972) transferiram plantas crescendo a temperatura constante de 17°C para 30°C e a sacarose caiu de 16 para 6,5% do peso fresco no período de 35 dias, indicando que o crescimento foi dependente do carboidrato armazenado no colmo. Como o crescimento ocorre por vias

opostas às do armazenamento de sacarose no colmo, a atividade da enzima invertase é aumentada (TAIZ; ZEIGER, 1998), transportando a sacarose do citosol para os vacúolos à custa de energia. Esse transporte dá-se em maior grau à noite, quando os estômatos estão fechados e não há transpiração.

Diversos trabalhos no estudo do mecanismo de ação da invertase e sacarose fosfato sintase foram publicados (GROF; CAMPBELL, 2001; RAE et al., 2005; ROHWER; BOTHA, 2001), porém nem todos os passos das reações envolvidas estão detalhados, exigindo estudos mais conclusivos. Du; Nose e Wasano (1999) mediram a taxa fotossintética e o metabolismo da cultura exposta à temperatura de 10°C em períodos de 4, 28 e 52 horas e verificaram uma diminuição da taxa fotossintética em mais de 50% e uma redução da atividade das enzimas PPDK e NADP-MDH em 70%. Estes resultados mostram que a enzima NADP-MDH limitou o fluxo de carbono em temperatura baixa sendo convertido em aspartato, principal componente na síntese de sacarose.

Variedades originárias de regiões tropicais mostraram-se mais sensíveis ao frio comparadas às variedades originárias de regiões temperadas. Nogueira et al. (2003) estudando a expressão gênica para a resposta a baixa temperatura (4°C) na variedade SP 80-3280 encontraram trinta e quatro genes induzidos pelo frio incluindo transportadores de fosfato e sintetizadores de celulose. Assim, o dano causado pelo frio em temperaturas inferiores a 0°C é em grande parte causado por desidratação celular e, por isso, dano causado pelo frio, estresse hídrico e salinidade têm muitas características e genes em comum (XIN; BROWSE, 2000). Dessa forma, existe um limite para os benefícios que as baixas temperaturas podem produzir na maturação e na qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima industrial. Waldron; Glasziou e Bull (1967) mostraram que abaixo de 7°C ocorre a inibição do acúmulo de sacarose.

Os fatores de correção e partição apresentados na Tabela 6b foram obtidos na bibliografia especializada. Com isso, possíveis divergências entre variedades podem ocorrer principalmente nos fatores de correção para disponibilidade hídrica, florescimento e partição de fotoassimilados para o colmo. É fato que cada variedade possui um sistema radicular próprio (VASCONCELOS, 2002) e impedimentos físicos e químicos afetam sobremaneira o desenvolvimento radicular. Desse modo, o efeito do estresse hídrico não é semelhante para todas as variedades. No caso do florescimento, esta problemática é ainda maior pelo fato de termos apenas o modelo matemático que descreve o processo na variedade NA 56-79 (PEREIRA; BARBIERI; MANIERO, 1986).

Dentre as safras estudadas, o modelo de previsão do florescimento indicou condições ambientais favoráveis somente no ano de 1998 com umidade elevada no solo, sendo aplicada a correção (equação 34) nas variedades que apresentam florescimento. Nos demais anos a temperatura não foi favorável. A correção em função do florescimento impõe uma penalização máxima de 8% na produção de carboidratos. Berding e Hurney (2005) estimam 10% como um valor ideal de penalização aplicado particularmente na primeira metade da safra.

Quando verificamos o fator partição de fotoassimilados, buscamos a partição utilizada no modelo australiano QCANE. Apesar de existir indicações de que o comportamento varietal é semelhante para partição de fotoassimilados (INMAN-BAMBER; MUCHOW; ROBERTSON, 2002), o modelo foi calibrado utilizando a variedade Q138 considerando apenas a temperatura do ar. Ocorrem aumentos na fração particionada para o colmo principalmente quando a temperatura passa de 16°C para 10°C e uma diminuição na partição para folhas e meristema (SINGELS; DONALDSON; SMIT, 2005). Thornley e Johnson (1990) sugeriram que a partição é função de fatores como provisão de nitrogênio, disponibilidade hídrica e taxa de crescimento, além da temperatura. Porém, para cana-de-açúcar em condições irrigadas como da Austrália, a temperatura do ar é o fator principal (GLASZIOU et al., 1965).

As invertases têm função fundamental na partição dos fotossintetizados para o acúmulo de sacarose ou crescimento (HATCH; GLASZIOU, 1963). Em condições favoráveis ao crescimento, a atividade da invertase ácida solúvel (IAS) é alta. A quantidade de IAS vacuolar diminui com a idade do internódio sendo a mesma inativa na maturação e na queda da taxa de crescimento. Com a diminuição na atividade da IAS o teor da invertase neutra (IN) aumenta, agindo na hidrólise da sacarose que vem do floema, culminando na formação da sacarose-P e no subsequente armazenamento da sacarose no vacúolo.

Os principais modelos de cana-de-açúcar utilizam uma dinâmica fonte-dreno para simular a partição da biomassa em sacarose, não levando em consideração a ação das invertases. A demanda pelo crescimento do colmo e estrutura foliar tem prioridade sobre o armazenamento de sacarose que é regulada pela temperatura, estresse hídrico e nitrogênio. Somente quando todos os drenos são supridos ocorre o acúmulo de sacarose. No APSIM, uma fração constante da biomassa do colmo é particionada em sacarose quando excede uma quantia mínima. Quando há baixa demanda no crescimento do colmo, o excesso assimilado é armazenado como sacarose (SINGELS; DONALDSON; SMIT, 2005). No QCANE (LIU; BULL, 2001) o acúmulo de

sacarose é calculado como não-fibra do crescimento total do colmo em função da temperatura, fazendo a distinção entre topo e parte industrializável. O CANEGRO utiliza uma aproximação semelhante (SINGELS; DONALDSON; SMIT, 2005).

A respiração de manutenção corrigida em função da temperatura e idade da planta (Tabela 6b) também sofre a influência de outros fatores como concentração de CO₂ e O₂ e de acordo com Loomis e Amthor (1999), nenhum método tem a habilidade para explicar as interações entre respiração, fotossíntese e fotorrespiração. Ainda, não se conhece todo o processo que mantém as estruturas celulares e gradientes intracelulares de íons e metabólicos. Na respiração de crescimento Penning de Vries; Brunsting e Van Laar (1974) encontraram uma solução para o problema construindo um balanço do uso de substratos. Estimando a biomassa, tem-se o cálculo da quantidade de substrato e assim a respiração envolvida em sua síntese. Desta forma, a correção da respiração de crescimento (Tabela 6b) foi simplificada. Nos modelos, a taxa da respiração de crescimento (g.m⁻².dia⁻¹) é calculada assumindo fração constante da fotossíntese (g.m⁻².dia⁻¹). No PREDPOL utilizaram-se dados de Barbieri (1993) que considerou um consumo de 0,21 g.g⁻¹. Inman-Bamber (1991) utilizou um consumo de 0,242 g.g⁻¹ e Liu e Bull (2001), 0,33 g.g⁻¹.

Na correção do IAF (Tabela 6b), utilizou-se o valor fixo de $k = 0,58$. Como discutido anteriormente, cada variedade possui um determinado coeficiente de extinção variável com o desenvolvimento (ZHOU; SINGELS; SMIT, 2003) e com a elevação do ângulo solar (BOOTE; PICKERING, 1994). Mantendo o espaçamento fixo, possivelmente ocorrerá pequena variação no k das variedades, tendo pouco efeito na fração da radiação solar interceptada como observado por Muchow et al. (1997). Entretanto, observaram-se nas duas variedades estudadas diferentes ângulos e dimensões foliares sendo recomendado o uso do k ideal para cada variedade na simulação da interceptação da radiação solar. Outra limitação do modelo é desconsiderar a variação da radiação solar global incidente na cultura de acordo com a época do ano (Tabela 3), sendo considerada no modelo somente a média dos meses. Considerar a variação diária da radiação solar melhoraria a correção do IAF.

Na Tabela 7, utilizando o modelo de crescimento de raiz (VAN ANTWERPEN, 1999) em função da somatória calórica ($T_b = 10^\circ\text{C}$), observa-se um crescimento médio inicial de 17 mm.dia⁻¹. No final do ciclo este valor cai para 5 mm.dia⁻¹ alcançando 2,4 m de profundidade. Glover (1967) encontrou uma taxa inicial de poucos mm.dia⁻¹ até 20 mm.dia⁻¹ após a brotação em condições favoráveis. Dependendo do solo e da temperatura este valor pode variar de 40 mm.dia⁻¹

¹ para solos arenosos e 28 mm.dia⁻¹ para solos argilosos. Em períodos curtos Van Dillewijn (1952) encontrou taxa de crescimento de 80 mm.dia⁻¹ em condições ideais. Laclau (2005) encontrou valores semelhantes de 72 mm.dia⁻¹ na cana irrigada e 80 mm.dia⁻¹ em sequeiro. Como citado na revisão de literatura, em ambientes sem impedimentos físicos considera-se a extração de água pelas raízes até os 2,1 m de profundidade (VAN ANTWERPEN, 1999). Limitações no crescimento das raízes como disponibilidade de água não foi considerado, sendo este fator de extrema importância, bem como os químicos (Al³⁺). A modelagem torna-se mais complexa se considerarmos a influencia hormonal no desenvolvimento das raízes (PERES; KERBAUY, 2000).

Para confirmar ou não o uso do modelo de raiz (VAN ANTWERPEN, 1999), realizou-se em 23/06/2005 a abertura de trincheiras na área e a descrição do perfil do solo (Tabela 8). Observaram-se impedimentos físicos na profundidade de 50 cm, indicando que o modelo não é adequado para simular o crescimento das raízes nesta área.

Tabela 8 - Descrição do perfil do solo

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor	Textura	Estrutura	Consistência	
					Seca	Úmida
A	0-15	cinza	média	blocos	duro	firme
Bi	15-50	roxa	argilosa	blocos	muito duro	firme
R	50-	roxa				

Baseado desta forma no trabalho de Prado; Landell e Rossetto (2002) onde o ambiente D2 é caracterizado por apresentar a CAD variando entre 15 e 70 mm assumem valores da CAD em função do estágio fenológico e somatória calórica considerando o impedimento físico de 50 cm na área toda (Tabela 9).

Tabela 9 - Capacidade de Água Disponível (CAD) em mm, função do estágio fenológico e somatória calórica

CAD (mm)	Estádio Fenológico	ΣGD (Tb = 20°C)
20	Estabelecimento	0-200
35	Desenvolvimento Vegetativo	200-1000
50	Maturação	1000-

Com isso, selecionou no banco de dados da usina áreas com o mesmo ambiente, variedade, estágio e corte anterior, pois existe diferença na produtividade de açúcar em épocas distintas de plantio ou corte anterior (MARCHIORI et al., 2006) obtendo amostras diárias de ATR. As variáveis independentes do modelo consistiram de valores obtidos até 150 dias anteriores à colheita divididos em decênios. Scarpari e Beauclair (2004b) associaram os graus-dia negativos de cinco meses anteriores com a maturação. Glover (1971) relacionou o conteúdo de sacarose com temperaturas mínimas de três meses antes. Os modelos são apresentados a seguir.

Variedade: RB 72 454, estágio: soca, ambiente: C, corte anterior: julho, agosto e setembro.

$$\begin{aligned}
 \text{ATR} = & 187,768254 - 0,376227*\text{GDN}10 - 0,107788*\text{GDN}30 - 0,174377*\text{GDN}40 + \\
 & 0,133110*\text{GDN}50 - 0,267745*\text{GDN}80 - 0,559121*\text{GDN}90 - 0,216612*\text{GDN}100 - \\
 & 0,094682*\text{GDN}110 - 0,188560*\text{GDN}120 + 0,115217*\text{GDN}130 - 0,108953*\text{GDN}140 - \\
 & 0,244565*\text{GDN}150 + 0,060919*\text{ARM}10 - 0,146820*\text{ARM}20 + 0,084514*\text{ARM}30 - \\
 & 0,049690*\text{ARM}50 + 0,096236*\text{ARM}80 + 0,353100*\text{ARM}90 + 0,183794*\text{ARM}100 + \\
 & 0,075495*\text{ARM}110 + 0,098779*\text{ARM}130 + 0,199083*\text{ARM}150 - 0,032143*\text{FOTO}10 - \\
 & 0,023723*\text{FOTO}30 + 0,031845*\text{FOTO}50 + 0,011255*\text{FOTO}60 + 0,026781*\text{FOTO}70 - \\
 & 0,030164*\text{FOTO}80 - 0,045157*\text{FOTO}90 - 0,034631*\text{FOTO}110 - 0,023015*\text{FOTO}120 - \\
 & 0,007867*\text{FOTO}130 - 0,006825*\text{FOTO}140 - 0,008487*\text{FOTO}150; \\
 R^2 = & 0,2613*; \text{C.V.} = 7,94996; \text{Raiz QMRes.} = 11,10805; n = 6563
 \end{aligned}
 \tag{40}$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN10, 30, 40, 50, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 e 150 = graus-dia negativos do decênio anteriores a 10, 30, 40, 50, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 e 150 dias da colheita (em °C), ARM10, 20, 30, 50, 80, 90, 100, 110, 130 e 150 = armazenamento de água no solo do decênio anteriores a 10, 20, 30, 50, 80, 90, 100, 110, 130 e 150 dias da colheita (em mm), FOTO10, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 110, 120, 130, 140 e 150 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 10, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 110, 120, 130, 140 e 150 dias da colheita (em kg.ha⁻¹).

Variedade: RB 72 454, estágio: soca, ambiente: D, corte anterior: julho, agosto e setembro.

$$\begin{aligned}
 \text{ATR} = & 189,594969 + 0,107908*\text{GDN}10 - 0,105285*\text{GDN}20 - 0,117615*\text{GDN}30 - \\
 & 0,284108*\text{GDN}40 - 0,234862*\text{GDN}60 - 0,490717*\text{GDN}70 - 0,229141*\text{GDN}90 - \\
 & 0,281544*\text{GDN}100 - 0,188213*\text{GDN}120 + 0,261173*\text{GDN}130 + 0,370235*\text{GDN}140 -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&0,428128*\text{GDN150} - 0,212890*\text{ARM10} + 0,219268*\text{ARM20} - 0,247671*\text{ARM30} - \\
&0,104784*\text{ARM40} + 0,045852*\text{ARM50} + 0,182694*\text{ARM60} + 0,231163*\text{ARM70} + \\
&0,309838*\text{ARM90} + 0,172230*\text{ARM100} + 0,093494*\text{ARM120} - 0,020215*\text{FOTO10} - \\
&0,046226*\text{FOTO20} - 0,023383*\text{FOTO30} + 0,006971*\text{FOTO50} - 0,017361*\text{FOTO60} - \\
&0,049657*\text{FOTO70} + 0,031188*\text{FOTO80} - 0,028217*\text{FOTO90} - 0,016313*\text{FOTO100} - \\
&0,011208*\text{FOTO120} - 0,002219*\text{FOTO140} - 0,019014*\text{FOTO150}; \\
&R^2 = 0,2186*; \text{C.V.} = 7,73597; \text{Raiz QMRes.} = 10,95695; n = 7541 \qquad (41)
\end{aligned}$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN10, 20, 30, 40, 60, 70, 90, 100, 120, 130, 140 e 150 = graus-dia negativos do decênio anteriores a GDN10, 20, 30, 40, 60, 70, 90, 100, 120, 130, 140 e 150 dias da colheita (em °C), ARM10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, 100, 120 = armazenamento de água no solo do decênio anteriores a 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 90, 100, 120 dias da colheita (em mm), FOTO10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140 e 150 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140 e 150 dias da colheita (em kg.ha⁻¹).

Analisando todas as variáveis independentes selecionadas nos modelos de previsão do ATR da variedade RB 72 454 temos os três fatores considerados, com maior peso na formação do coeficiente de determinação (R^2) as variáveis FOTO140 ($R^2 = 0,1005$; equação 40) e FOTO150 ($R^2 = 0,0413$; equação 41), confirmando a importância da escolha dos fatores partição de fotoassimilados para o colmo, armazenamento de água no solo e graus-dia negativos. Esperava-se conforme a literatura, sinais positivos para os parâmetros estimados dos graus-dia negativos (ALEXANDER, 1973) e sinais negativos para armazenamento de água no solo (HUMBERT, 1968). Entretanto, como a variedade RB 72 454 é de maturação tardia, as áreas são colhidas no final da safra sofrendo a influência das baixas temperaturas noturnas dos meses de junho, julho e agosto (Anexo F) onde o sinal da maioria dos parâmetros estimados dos graus-dia negativos é negativo, indicativo de frio excessivo, prejudicando a maturação (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004b) e a fotossíntese do dia seguinte (GRANTZ, 1989). A pequena taxa de fotossíntese em baixas temperaturas está associada com a diminuição da velocidade das reações de carboxilação. O mesmo ocorreu com o armazenamento de água no solo, a inversão do sinal do parâmetro estimado de negativo para positivo é indicativo de seca moderada que beneficia a maturação. Déficit hídrico superior a 130 mm nos meses que antecedem a colheita (Anexo G), já afeta o acúmulo de sacarose no colmo prejudicando a maturação (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004b).

Para Inman-Bamber (2004) este valor é de 145 mm. Valores de déficit hídricos superiores a estes reduzem severamente o acúmulo de sacarose no colmo (MARCHIORI, 2004) e o balanço de carbono torna-se negativo, sendo a taxa de respiração maior que a fotossíntese (GLOVER, 1974). Ashton (1956) verificou que a taxa fotossintética começa a decrescer quando o solo atinge umidade correspondente a um valor intermediário entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Abaixo deste limite intermediário, a fotossíntese diminui progressivamente até ser praticamente nula próxima ao ponto de murcha permanente. Quando há reduções de biomassa de cana-de-açúcar em até 10% em função do estresse hídrico, normalmente o rendimento de sacarose é aumentado ou inalterado. Além deste ponto, há redução no rendimento de sacarose (ROBERTSON; DONALDSON, 1998). Assim, déficit hídrico superior a 130 mm ou excesso de água no solo prejudicam ou atrasam a maturação e nestes casos o sinal do parâmetro estimado é negativo. Esta particularidade seria evidenciada se considerássemos no lugar do parâmetro armazenamento de água no solo o déficit hídrico do solo, constatando a inversão de sinal do parâmetro estimado quando atingisse uma seca prejudicial maior que 130 mm antes da colheita. Os sinais dos parâmetros estimados da variável partição de fotoassimilados para o colmo (FOTO) quando positivo indicam maior quantidade de carboidratos sendo carreados para o colmo e quando negativo, menor quantidade. Esta escolha depende das condições ambientais encontradas pela planta.

Outra particularidade desta variedade comparada às outras é a rápida recuperação do desenvolvimento com o estresse hídrico sofrido quando do fornecimento de água, confirmado pela inversão de sinal no decênio posterior dos parâmetros estimados das variáveis independentes armazenamento de água no solo. Plantas submetidas a déficits hídricos demoram vários dias para recuperar a fotossíntese após o fornecimento de água, sendo mais longo o período de recuperação quanto mais severa a deficiência (GLOVER, 1974) e intensa a radiação solar (ASHTON, 1956).

Os modelos apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) que é a proporção da discrepância explicada pelo modelo de regressão (NAGELKERKE, 1991) baixo, em média 23%, sendo útil como uma medida de sucesso para explicar a variabilidade da variável dependente em função das variáveis independentes. Este fato pode ser explicado pelo grande número de amostras analisadas e a imensa variabilidade espacial do canavial, além de fatores não considerados como a nutrição mineral principalmente nitrogênio e potássio que influem sensivelmente na maturação, ataque de pragas e doenças como o complexo broca-podridão ocasionando a morte dos ponteiros,

perdas de sacarose e a formação de fenóis, perdas de pós-colheita com a contaminação de microrganismos onde o mais conhecido é o *Leuconostoc mesenteroides*, colheita de cana crua ou queimada e ainda particularidades locais evidenciadas nas áreas de calibração (Anexo E).

Os modelos apresentaram valores do coeficiente de variação (C.V.) e da raiz do quadrado médio do resíduo (Raiz QMRes.) aceitáveis em torno de 7,8 e 11 respectivamente.

Variedade: RB 85 5156, estágio: soca, ambiente: C, corte anterior: abril, maio e junho.

$$\text{ATR} = 141,097180 + 5,432435*\text{GDN130} + 0,006079*\text{FOTO40} + 0,022853*\text{FOTO60} - 0,017370*\text{FOTO80} - 0,020366*\text{FOTO100};$$

$$R^2 = 0,2417*; \text{C.V.} = 7,14421; \text{Raiz QMRes.} = 9,81831; n = 1447 \quad (42)$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN130 = graus-dia negativos do decênio anteriores a 130 dias da colheita (em °C), FOTO40, 60, 80 e 100 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 40, 60, 80 e 100 dias da colheita (em kg.ha⁻¹).

Variedade: RB 85 5156, estágio: soca, ambiente: D, corte anterior: abril, maio e junho.

$$\text{ATR} = 134,299826 + 0,418328*\text{GDN100} - 0,723190*\text{ARM20} - 0,262436*\text{ARM30} + 0,270336*\text{ARM70} + 0,086424*\text{FOTO10} - 0,012407*\text{FOTO20} + 0,014145*\text{FOTO80} - 0,003093*\text{FOTO140};$$

$$R^2 = 0,1840*; \text{C.V.} = 7,83367; \text{Raiz QMRes.} = 10,67520; n = 1860 \quad (43)$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN100 = graus-dia negativos do decênio anteriores a 100 dias da colheita (em °C), ARM20, 30 e 70 = armazenamento de água no solo do decênio anteriores a 20, 30 e 70 dias da colheita (em mm), FOTO10, 20, 80 e 140 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 10, 20, 80 e 140 dias da colheita (em kg.ha⁻¹).

As variáveis independentes selecionadas nos modelos de previsão do ATR na variedade RB 85 5156 apresentaram maior peso na formação do R² a variável FOTO60 (R² = 0,1591; equação 42) e ARM20 (R² = 0,0733; equação 43). Sendo uma variedade de alta precocidade (Figura 15), a colheita das áreas é feita no início da safra apresentando alto teor de sacarose em abril/maio, fato confirmado pelo modelo de previsão selecionando o fator graus-dia negativos com sinal positivo 130 e 100 dias respectivamente anterior à colheita, apesar de apresentarem um baixo R². É

indicativo de que nesta época, próximo ao período indutivo, há um sinal bioquímico estimulado pela variação na temperatura definindo pelo acúmulo de sacarose ou florescimento, pois esta variedade apresenta florescimento intenso de acordo com a Universidade Federal de São Carlos (2004), podendo ainda aventar a hipótese de que os parentais desta variedade sejam oriundos de regiões frias e que neste caso a variação do fotoperíodo, anterior à variação da temperatura, com o encurtamento dos dias tenha grande influência na sinalização da maturação. Com isso, as temperaturas mínimas deste período que antecedem a colheita entre os 10°C e 20°C (Anexo F) são ideais para maturação.

No modelo para o ambiente C (equação 42) observa-se que não houve a seleção da variável armazenamento de água no solo contrastando com a seleção dessa variável para o ambiente D (equação 43). Dessa forma, no ambiente C a variedade sofreu menor estresse hídrico antes dos cinco meses da colheita, ao contrário do ambiente D onde a variável armazenamento de água no solo influenciou no armazenamento de sacarose, sofrendo maior estresse hídrico.

Os modelos apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) também baixo, explicando em média 21% da variação do ATR e valores do coeficiente de variação (C.V.) e da raiz do quadrado médio do resíduo (Raiz QMRes.) em torno de 7,4 e 10,2 respectivamente.

Variedade: RB 85 5536, estágio: soca, ambiente: C, corte anterior: julho, agosto e setembro.

$$\text{ATR} = 128,166704 + 0,681510*\text{GDN}50 - 0,094350*\text{FOTO}20 - 0,014786*\text{FOTO}80;$$

$$R^2 = 0,3420*; \text{C.V.} = 6,90617; \text{Raiz QMRes.} = 9,54379; n = 202 \quad (44)$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN50 = graus-dia negativos do decênio anteriores a 50 dias da colheita (em °C), FOTO20 e 80 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 20 e 80 dias da colheita (em kg.ha⁻¹).

Variedade: RB 85 5536, estágio: soca, ambiente: D, corte anterior: julho, agosto e setembro.

$$\text{ATR} = 155,521275 - 0,362763*\text{GDN}20 - 0,191678*\text{GDN}70 + 0,718472*\text{GDN}90 -$$

$$0,120382*\text{ARM}10 - 0,264176*\text{ARM}70 - 0,214592*\text{ARM}90 - 0,159234*\text{ARM}150 -$$

$$0,013502*\text{FOTO}20 + 0,018125*\text{FOTO}90;$$

$$R^2 = 0,4202*; \text{C.V.} = 6,24973; \text{Raiz QMRes.} = 9,33834; n = 1213 \quad (45)$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN20, 70 e 90 = graus-dia negativos do decênio anteriores a 20, 70 e 90 dias da colheita (em °C), ARM10, 70, 90 e 150 = armazenamento de água no solo do decênio anteriores a 10, 70, 90 e 150 dias da colheita (em mm), FOTO20 e 90 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 20 e 90 dias da colheita (em kg.ha⁻¹).

As variáveis independentes selecionadas nos modelos de previsão do ATR na variedade RB 85 5536 apresentaram maior peso na formação do R² a variável GDN50 (R² = 0,3008; equação 44) e GDN20 (R² = 0,0536; equação 45). A variedade RB 85 5536 é de maturação média na safra, onde a colheita das áreas é feita nos meses de julho, agosto e setembro. Os modelos selecionaram o fator graus-dia negativos com sinal positivo 50 e 90 dias respectivamente anterior à colheita, sinalizando neste caso que o frio é determinante para intensificar o processo de maturação. No caso da RB 85 5156 houve uma coincidência de épocas por ser altamente precoce. Para RB 85 5536, tendo florescimento ausente (MATSUOKA et al., 1998) a estratégia de sobrevivência é concentrar sacarose justamente com o estímulo ocorrido no período indutivo após a juvenilidade e a intensificação do processo é feita nos meses de abril e maio de acordo com as variáveis selecionadas. Na equação 45, a influência do frio excessivo na maturação é evidente na seleção da variável GDN20 com sinal negativo representando os meses de junho, julho e agosto (Anexo F).

Semelhante a variedade RB 85 5156, no modelo para o ambiente C (equação 44) observa-se que não houve a seleção da variável armazenamento de água no solo contrastando com a seleção dessa variável para o ambiente D (equação 45).

Os modelos apresentaram um coeficiente de determinação (R²) médio explicando 38% da variação do ATR e valores do coeficiente de variação (C.V.) e da raiz do quadrado médio do resíduo (Raiz QMRes.) em torno de 6,5 e 9,4 respectivamente.

Variedade: SP 80-1842, estágio: soca, ambiente: B, corte anterior: outubro, novembro e dezembro.

$$\begin{aligned} \text{ATR} = & 147,275131 - 0,342700*\text{GDN10} + 0,277567*\text{GDN20} + 0,844158*\text{GDN40} - \\ & 0,270583*\text{GDN50} - 0,318500*\text{GDN60} - 0,245107*\text{ARM10} - 0,667261*\text{ARM30} + \\ & 0,055972*\text{ARM60} - 0,263820*\text{ARM70} + 0,050884*\text{FOTO40} - 0,030125*\text{FOTO90} - \\ & 0,013041*\text{FOTO120}; \end{aligned}$$

$$R^2 = 0,5155^*; C.V. = 4,95025; Raiz QMRes. = 7,17033; n = 872 \quad (46)$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN10, 20, 40, 50 e 60 = graus-dia negativos do decênio anteriores a 10, 20, 40, 50 e 60 dias da colheita (em °C), ARM10, 30, 60 e 70 = armazenamento de água no solo do decênio anteriores a 10, 30, 60 e 70 dias da colheita (em mm), FOTO40, 90 e 120 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 40, 90 e 120 dias da colheita (em kg.ha⁻¹).

Variedade: SP 80-1842, estágio: soca, ambiente: E, corte anterior: julho, agosto e setembro.

$$ATR = 149,215210 + 0,247882 * GDN10 - 0,209214 * GDN50 - 0,381975 * GDN90 + 0,336413 * GDN100 + 0,490202 * GDN110 - 0,121320 * ARM30 - 0,321143 * ARM60 + 0,232620 * ARM90 + 0,099074 * ARM100 + 0,191990 * ARM110 + 0,117329 * ARM120 - 0,108551 * ARM130 - 0,074258 * FOTO20 - 0,015472 * FOTO110 - 0,012933 * FOTO130;$$

$$R^2 = 0,4806^*; C.V. = 6,34835; Raiz QMRes. = 8,88239; n = 1841 \quad (47)$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN10, 50, 90, 100 e 110 = graus-dia negativos do decênio anteriores a 10, 50, 90, 100 e 110 dias da colheita (em °C), ARM30, 60, 90, 100, 110, 120 e 130 = armazenamento de água no solo do decênio anteriores a 30, 60, 90, 100, 110, 120 e 130 dias da colheita (em mm), FOTO20, 110 e 130 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 20, 110 e 130 dias da colheita (em kg.ha⁻¹).

Variedade: SP 80-1842, estágio: soca, ambiente: F, corte anterior: julho, agosto e setembro.

$$ATR = 141,017120 - 0,565115 * GDN20 + 0,202989 * GDN60 + 0,415215 * GDN70 - 0,376078 * GDN120 + 0,710564 * GDN130 - 0,309334 * GDN140 - 0,223136 * ARM40 + 0,088271 * ARM60 - 0,080017 * ARM110 + 0,077883 * ARM120 + 0,057226 * ARM140 - 0,006685 * FOTO90;$$

$$R^2 = 0,3771^*; C.V. = 7,01822; Raiz QMRes. = 9,59425; n = 1351 \quad (48)$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN20, 60, 70, 120, 130 e 140 = graus-dia negativos do decênio anteriores a 20, 60, 70, 120, 130 e 140 dias da colheita (em °C), ARM40, 60, 110, 120 e 140 = armazenamento de água no solo do decênio anteriores a 40, 60, 110, 120 e 140 dias da colheita (em mm), FOTO90 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 90 dias da colheita (em kg.ha⁻¹).

As variáveis independentes selecionadas nos modelos de previsão do ATR na variedade SP 80-1842 apresentaram maior peso na formação do R^2 a variável FOTO120 ($R^2 = 0,3645$; equação 46), FOTO130 ($R^2 = 0,2779$; equação 47) e GDN70 ($R^2 = 0,2305$; equação 48).

A variedade SP 80-1842 é de maturação média na safra, onde a colheita das áreas é feita normalmente nos meses de julho, agosto e setembro podendo se estender até o final da safra como no caso do ambiente B por questões operacionais.

Os modelos apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) médio explicando 46% da variação do ATR superando todas as outras variedades e valores do coeficiente de variação (C.V.) e da raiz do quadrado médio do resíduo (Raiz QMRes.) baixos comparado às outras variedades em torno de 6,1 e 8,5 respectivamente. Como a calibração do modelo foi feita no ambiente D2 (PRADO; LANDELL; ROSSETTO, 2002), possivelmente a validação nos ambientes B, E e F (JOAQUIM et al., 1994) seja dificultada mesmo com os bons valores de R^2 , C.V. e Raiz QMResíduo obtidos.

Variedade: SP 81-3250, estágio: soca, ambiente: D, corte anterior: julho, agosto e setembro.

$$\text{ATR} = 144,194531 + 0,532570 \cdot \text{GDN60} - 0,684498 \cdot \text{ARM130} + 0,044752 \cdot \text{FOTO30} - 0,073737 \cdot \text{FOTO50} + 0,021144 \cdot \text{FOTO90};$$

$$R^2 = 0,3287^*; \text{C.V.} = 6,24919; \text{Raiz QMRes.} = 8,75308; n = 507 \quad (49)$$

onde: ATR = Açúcar Total Recuperável (em kg de açúcar por tonelada de cana), GDN60 = graus-dia negativos do decênio anteriores a 60 dias da colheita (em °C), ARM130 = armazenamento de água no solo do decênio anteriores a 130 dias da colheita (em mm), FOTO30, 50 e 90 = fotoassimilados no colmo do decênio anteriores a 30, 50 e 90 dias da colheita (em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

As variáveis independentes selecionadas no modelo de previsão do ATR na variedade SP 81-3250 apresentaram maior peso na formação do R^2 a variável GDN60 ($R^2 = 0,2244$; equação 49).

A variedade SP 81-3250 é de maturação média na safra, onde a colheita das áreas é feita normalmente nos meses de julho, agosto e setembro. O sinal da variável GDN60 indica a influência positiva das baixas temperaturas na concentração de sacarose. Ao contrário, o sinal negativo do ARM130 evidencia que a umidade no solo atrasa a maturação condizendo com a

literatura (ALEXANDER, 1973). Esta faixa ótima em que a temperatura atua positivamente na maturação, sem danos de frio, varia de 10 a 20°C.

O modelo apresentou um coeficiente de determinação (R^2) médio explicando 33% da variação do ATR e valores do coeficiente de variação (C.V.) e da raiz do quadrado médio do resíduo (Raiz QMRes.) baixos; 6,2 e 8,7 respectivamente.

O próximo passo na atividade da modelagem após a construção e a calibração dos modelos é a simulação. Na simulação pretende-se reproduzir valores estimados ou previstos a partir de determinadas condições ambientais confrontando com valores medidos ou reais fazendo dessa forma a validação do modelo. Mitchell (1997) denomina esta validação de empírica por ser apenas parte do processo de validação. Entretanto é de extrema importância principalmente onde os valores previstos serão usados na tomada de decisão ao invés dos valores medidos. Para Sinclair e Seligman (2000) a demonstração do ajuste do modelo é necessária, mas não indica suficientemente sua validação obtida apenas nas circunstâncias específicas onde foi avaliado. A validação é obtida pelo conjunto de hipóteses na qual o modelo está baseado e em sua estrutura lógica, resolvendo um problema conceitual ou predizendo respostas da cultura. Oreskes; Shrader-Frechette e Belitz (1994) citam que um modelo pode ser invalidado, mas nunca validado. Um dos problemas é a dificuldade dos modeladores em parar os testes mesmo em situações de insucesso na validação. Tentativas de validação apenas mostram como o modelo se comporta em uma situação particular, não garantindo o desempenho debaixo de qualquer outra condição ambiental.

Com isso, modelos empíricos baseados em dados observados e expressos em equações de regressão devem ser validados somente no local de estudo, evitando a extrapolação dos resultados para outros locais. Lawes e Lawn (2005) citam exemplos de modelos empíricos que podem ser usados para muitos propósitos na indústria açucareira como o desenvolvimento de modelos regionais na Austrália para prever à curva de maturação, a estimativa de ganho genético das variedades, a melhoria na eficiência de provisão de matéria-prima para moagem e a avaliação da produtividade espaço-temporal das áreas. Bezuidenhout e Singels (2007) seguem a mesma linha na África do Sul.

Estas análises podem solucionar diversos problemas existentes na cadeia produtiva, complementando a pesquisa agrônômica como no caso da previsão da curva de maturação utilizando parâmetros climáticos ao invés de utilizar somente a média das safras sem considerar a influência do clima (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004b).

Utilizando os dados climáticos do Posto Meteorológico do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP obtivemos valores estimados pelos modelos sendo comparados com os valores medidos na safra 2003/2004 expressos nas Figuras 16 a 25.

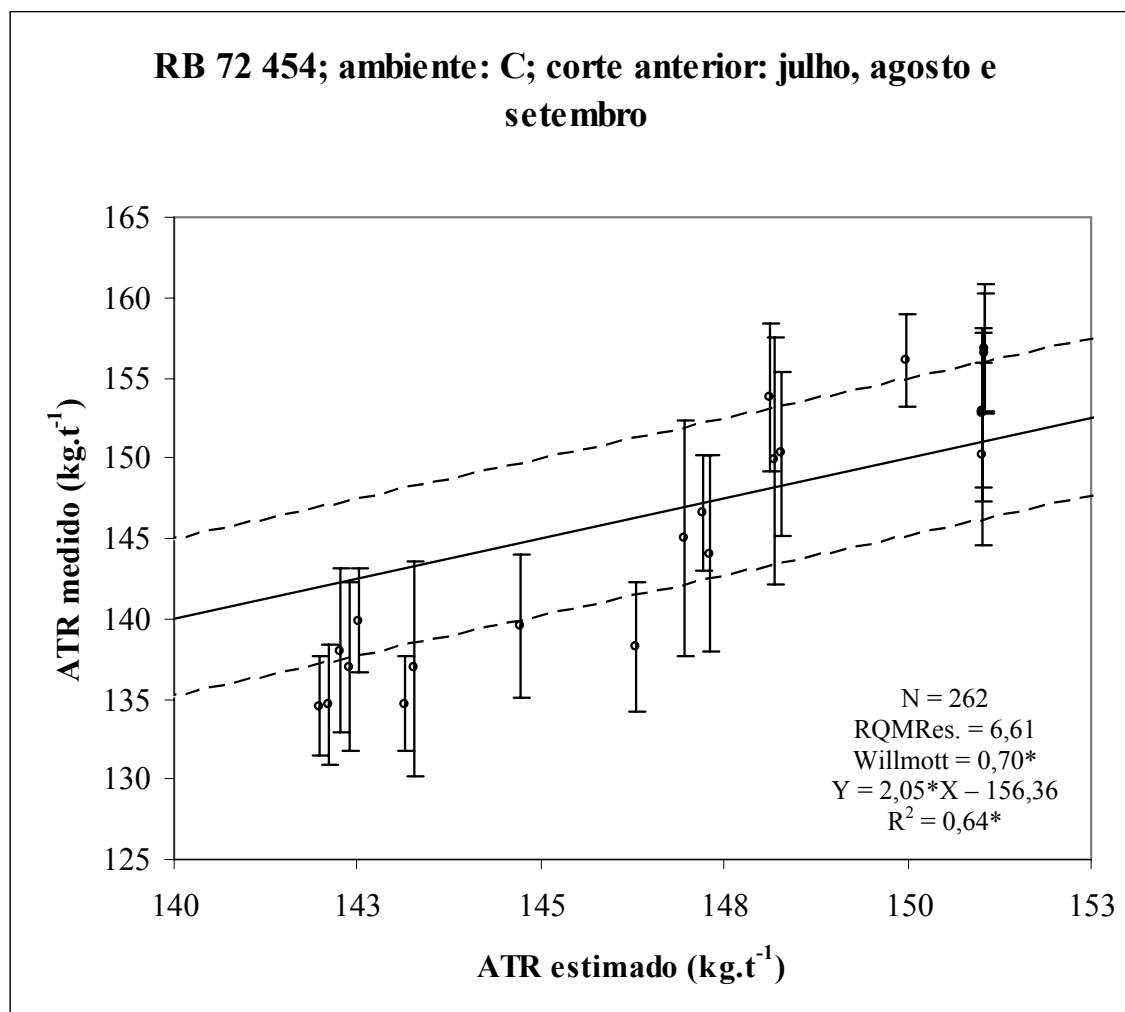


Figura 16 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

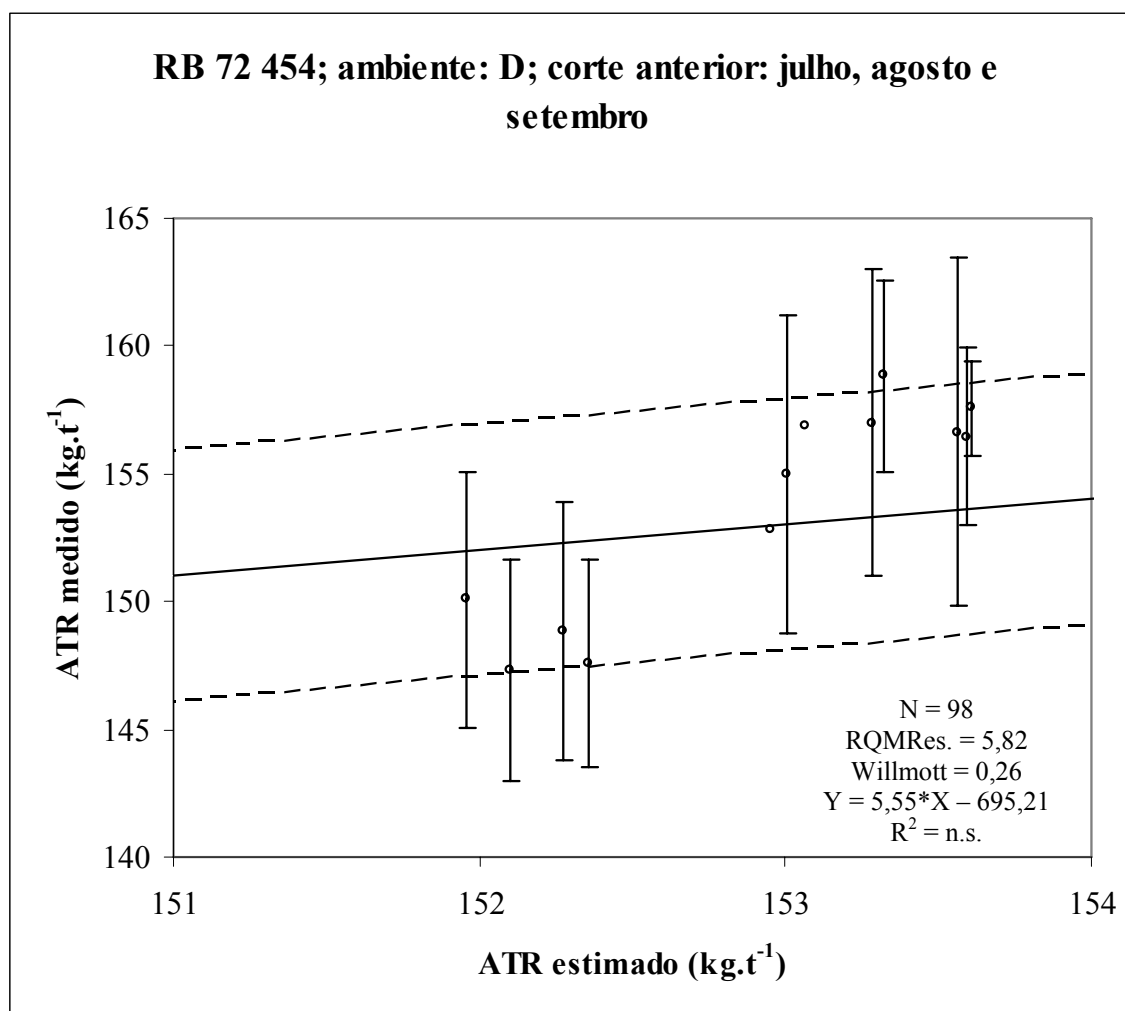


Figura 17 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

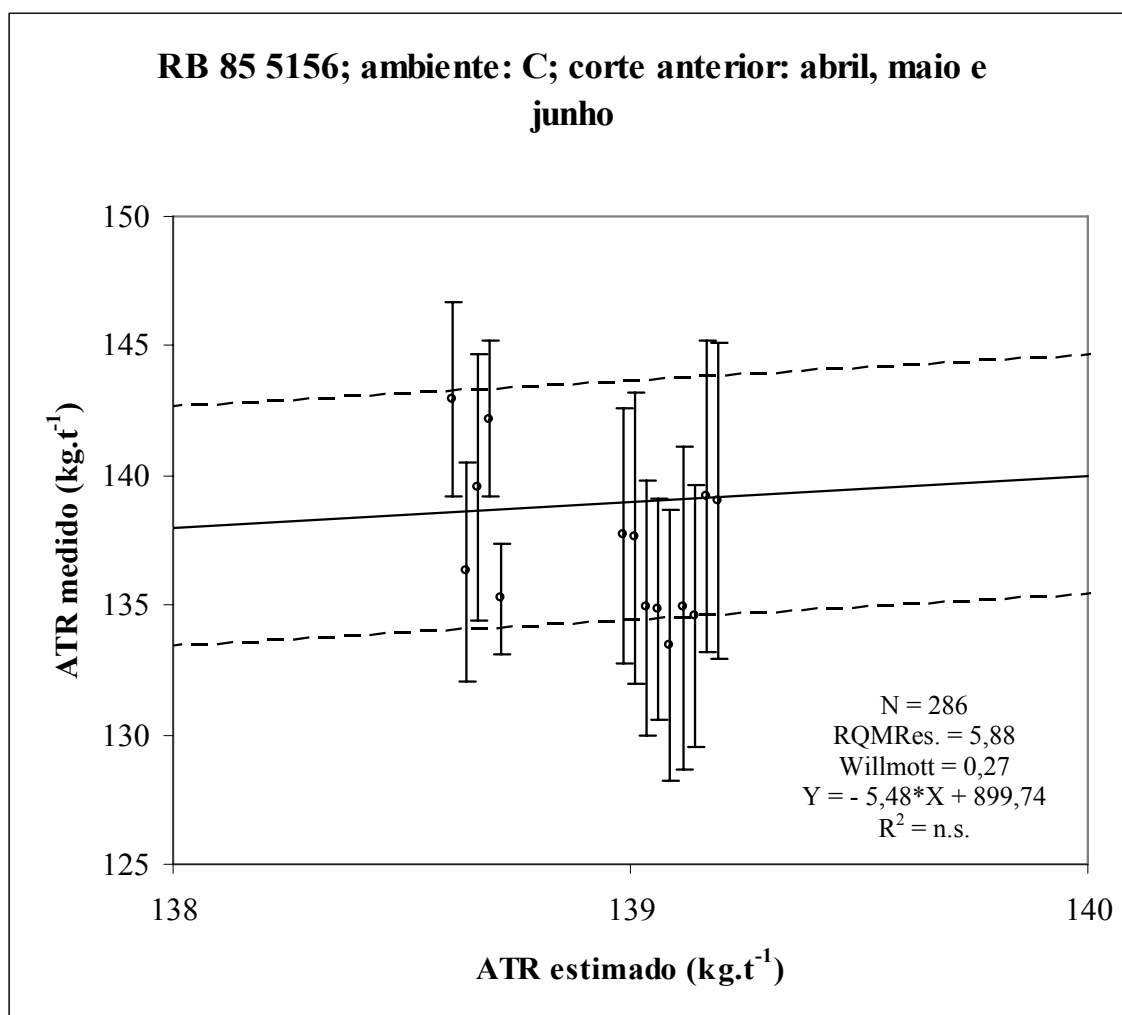


Figura 18 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

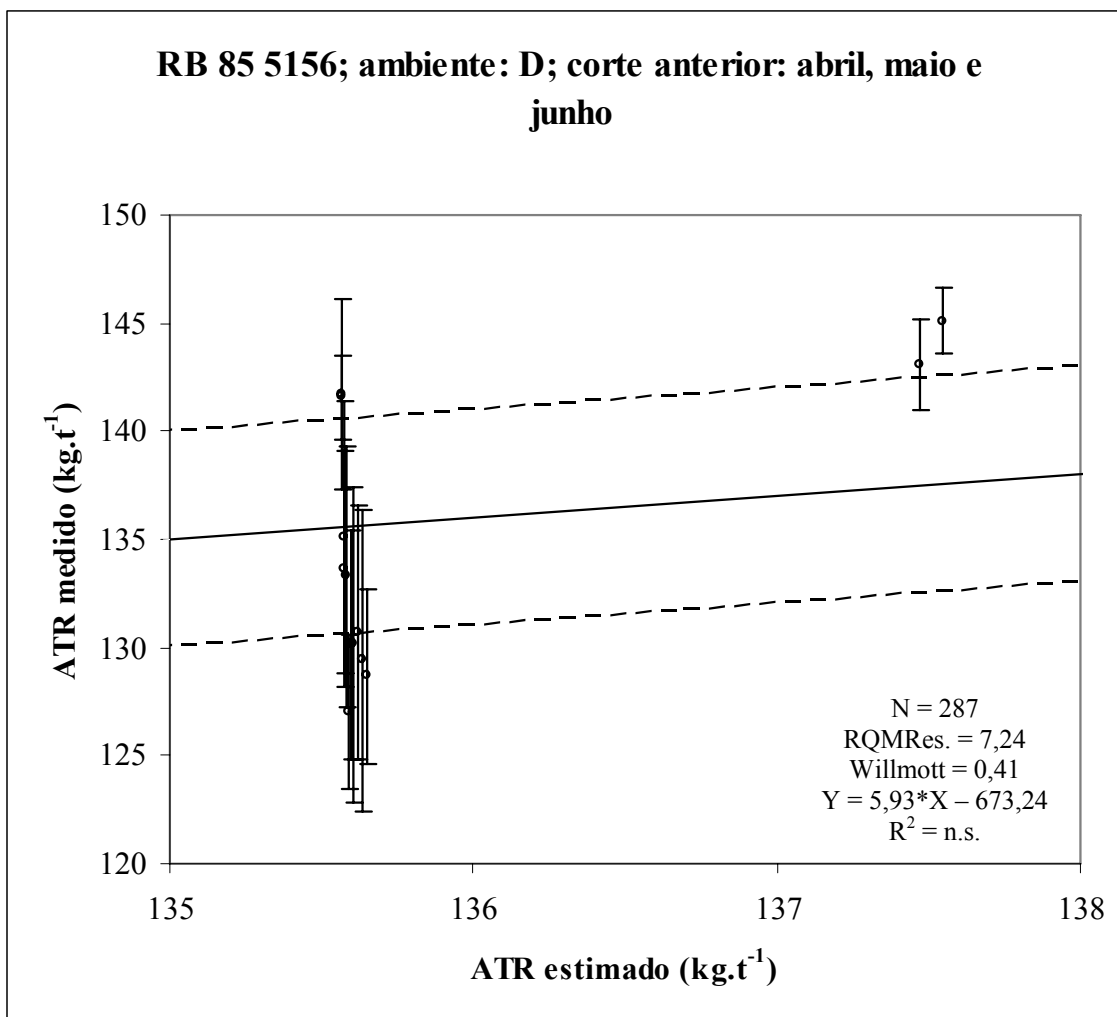


Figura 19 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

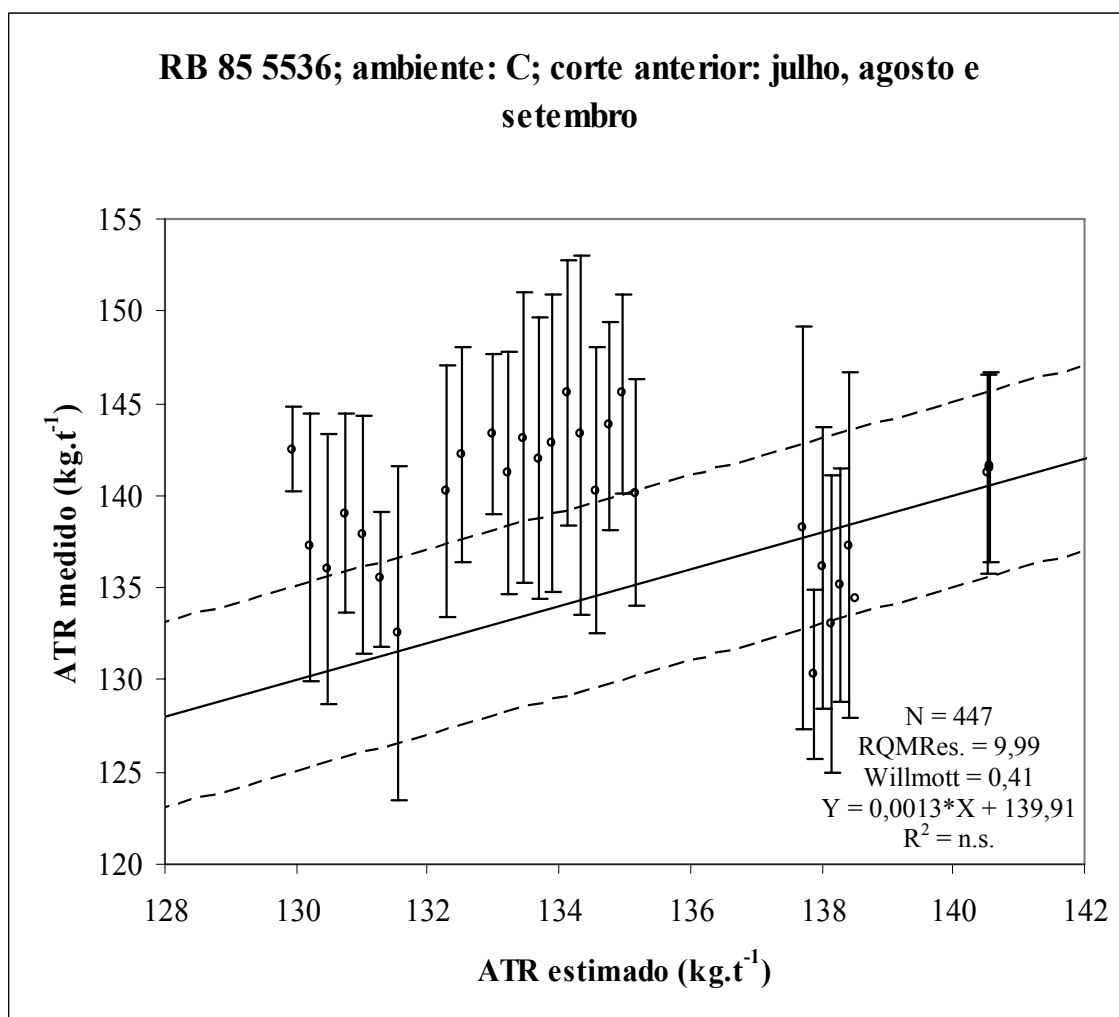


Figura 20 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

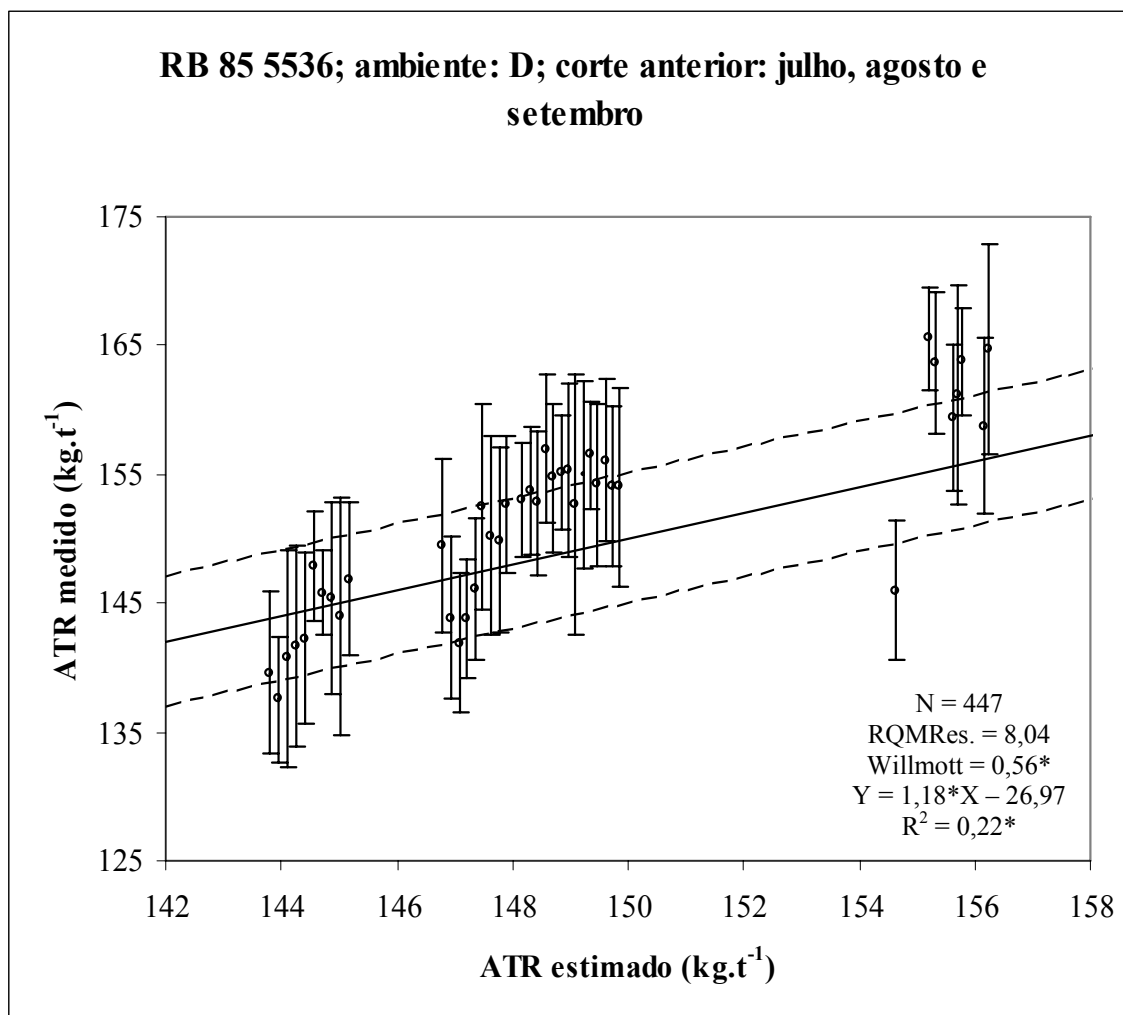


Figura 21 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

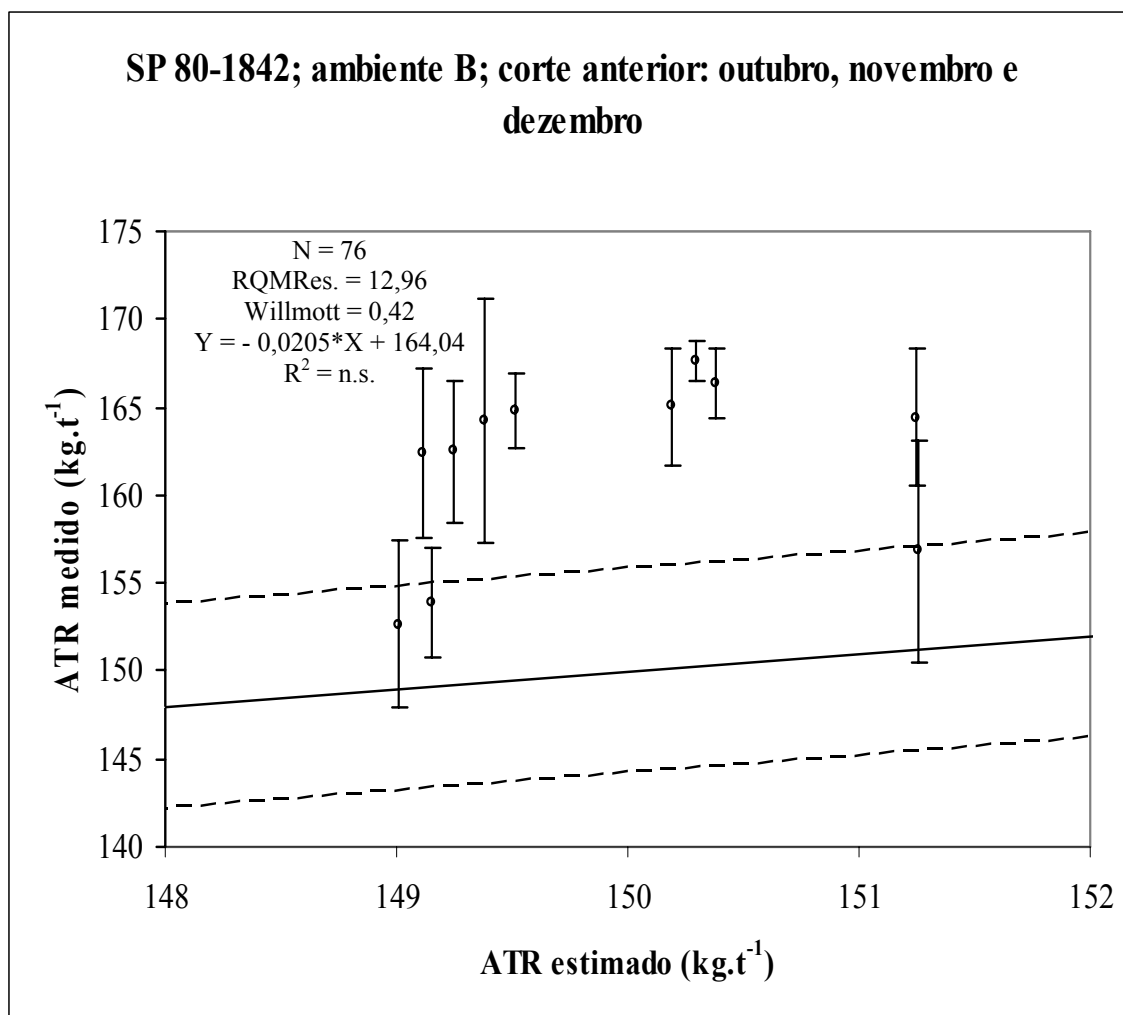


Figura 22 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

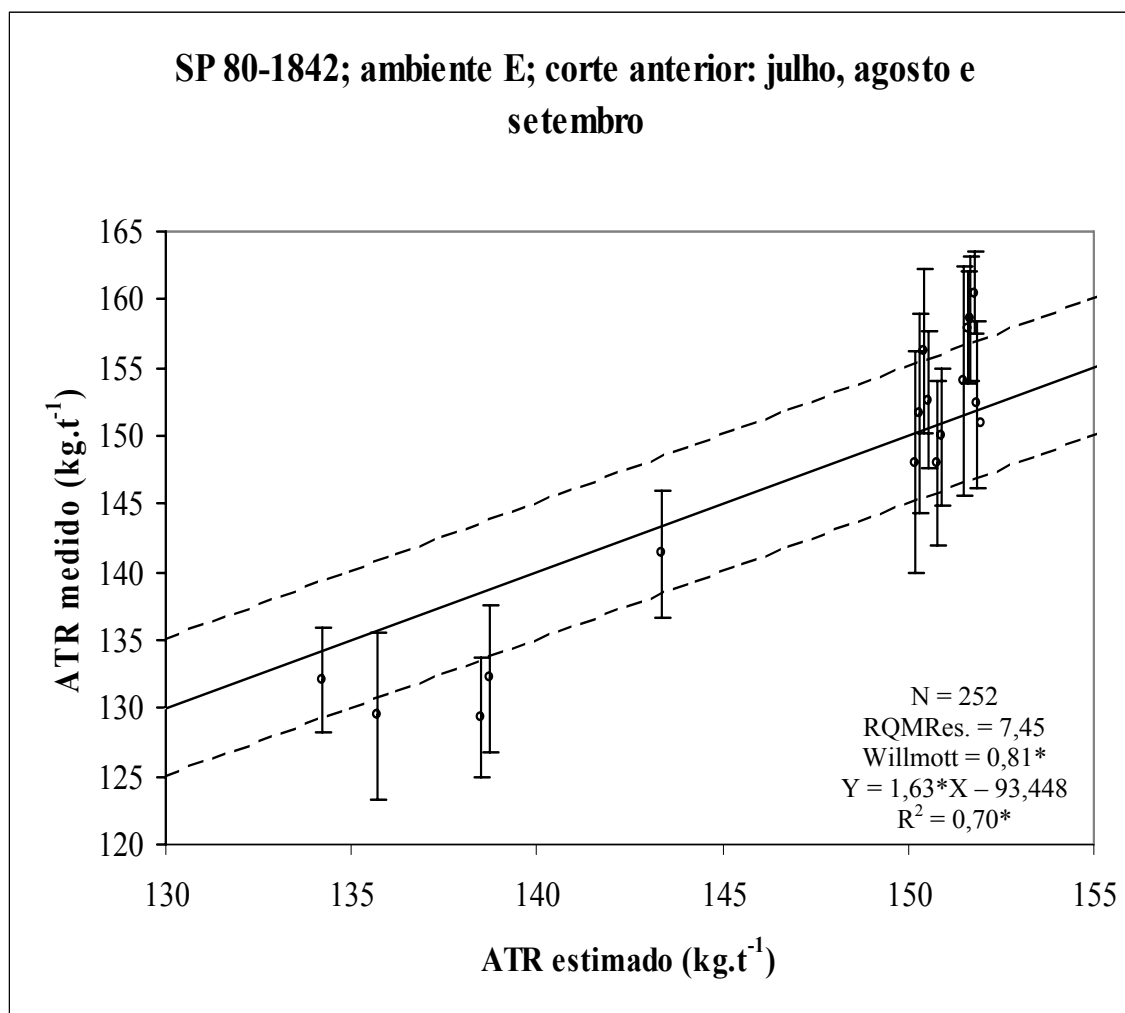


Figura 23 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

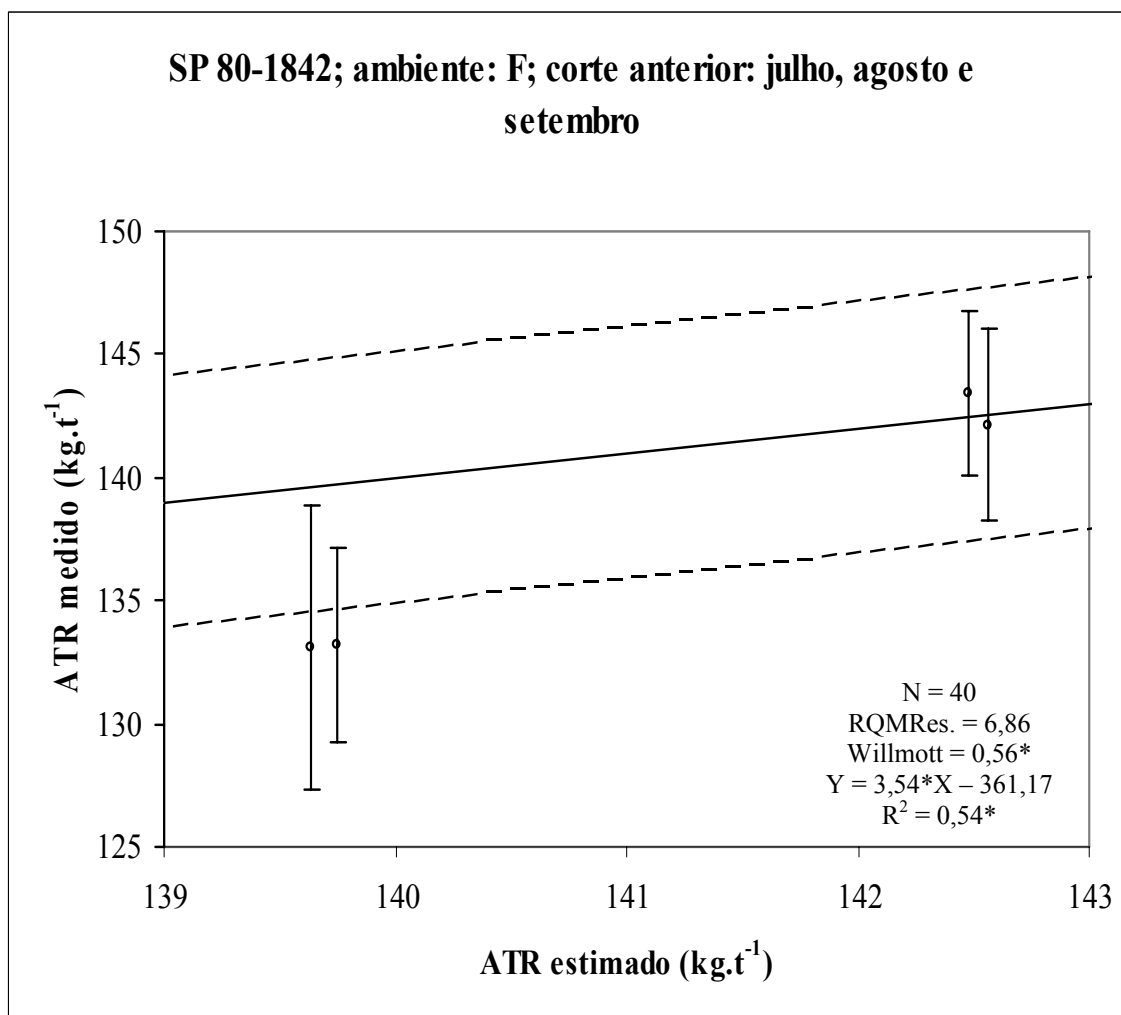


Figura 24 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

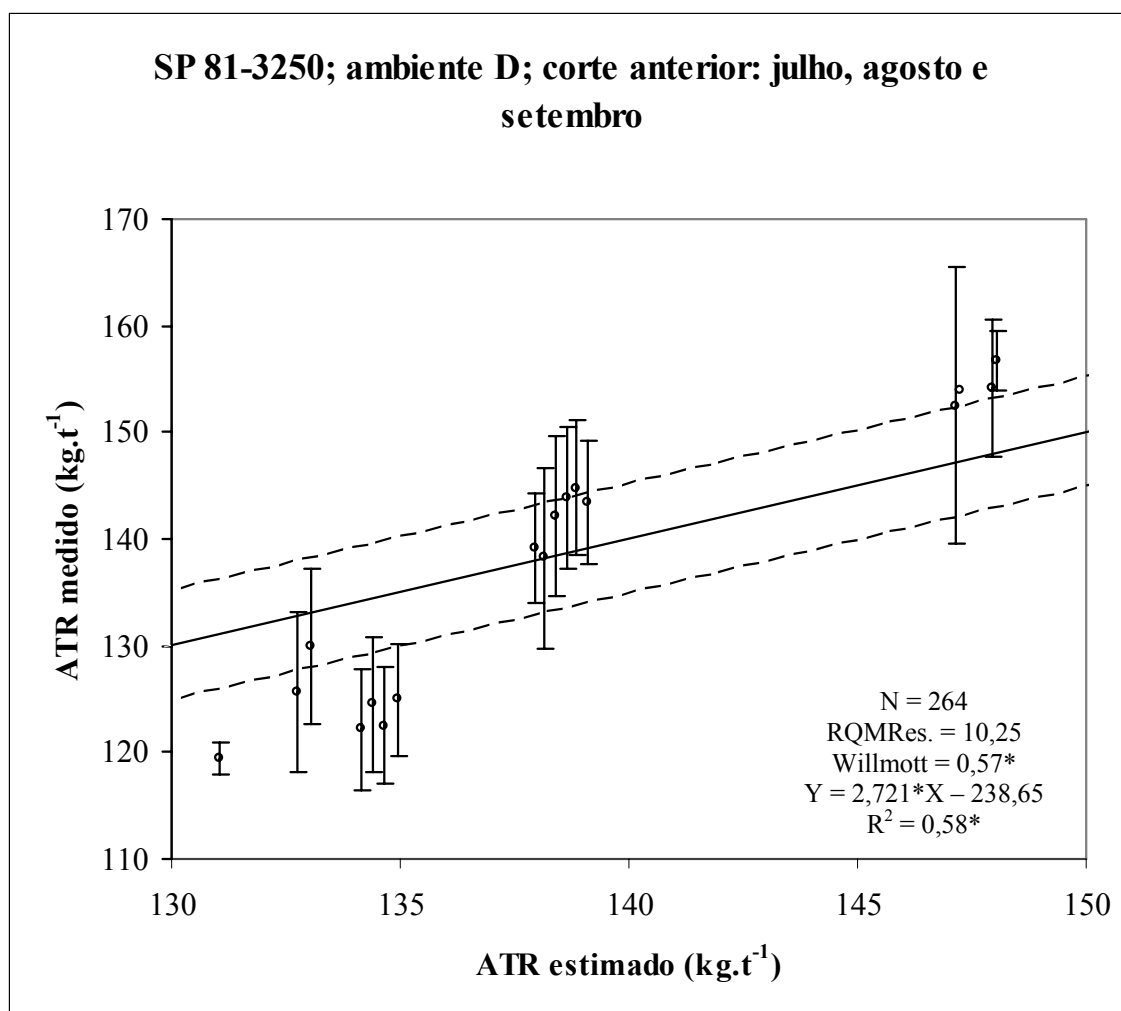


Figura 25 - ATR medido e o desvio padrão comparado com o ATR estimado pelo modelo. A linha cheia representa a linha 1:1 e a pontilhada o intervalo de confiança ($\pm 95\%$)

Através das validações realizadas no ano safra 2003/2004 observa-se que todos os modelos de maturação da cana-de-açúcar estimaram de forma aceitável o ATR sendo uma ferramenta adequada para uso em modelos de gestão. O pior resultado obtido foi na variedade SP 80-1842, ambiente B, que mesmo com um alto valor do R^2 (equação 46) apresentou um valor da RQMResíduo elevado, que é o erro associado à estimativa de 12,96 kg de sacarose.t de cana⁻¹. Como a calibração do modelo foi feita no ambiente D2 isto influenciou na previsão do ATR para o ambiente B. Dessa forma, um maior fracionamento no uso dos ambientes e uma calibração do modelo para cada ambiente diminuiriam esta dispersão, melhorando a validação principalmente em áreas heterogêneas. O menor erro deu-se justamente no ambiente D e variedade RB 72 454

sendo 5,82 kg de sacarose.t de cana⁻¹. O’Leary (2000) analisando o desempenho dos modelos APSIM – Sugarcane, CANEGRO e QCANE apresentou valores da RQMResíduo para sacarose no colmo de 4,93; 6,07 e 2,55 t de sacarose.ha⁻¹, respectivamente. Considerando uma produtividade média de 100 t de colmos.ha⁻¹, o menor erro encontrado na validação do modelo PREDPOL seria de 0,58 t de sacarose.ha⁻¹ e o maior 1,26 t de sacarose.ha⁻¹.

A comparação entre os modelos é uma tarefa difícil principalmente quando há escassez de informação dos mecanismos envolvidos e por tenderem a superestimar as estimativas desconsiderando pragas e doenças (HANSEN; JONES, 2000), mas todos os modelos citados têm um objetivo comum que é simular o rendimento de sacarose. Obviamente, modelos estatísticos funcionam bem somente nos locais calibrados, neste propósito o PREDPOL atingiu com sucesso seu objetivo. A validação neste caso utilizou valores de temperatura, precipitação e insolação já ocorridos no ano safra 2003/2004, entretanto o modelo permite a construção de vários cenários baseado em modelos de previsões climáticas já no início da safra fornecendo a curva de acúmulo de sacarose no colmo até o final da safra agrícola para cada variedade e ambiente de produção.

O índice de Willmott (1981) reflete o grau da variação medida em função da variação estimada não sendo uma medida de correlação. Quando o valor é 1,0 indica o ajuste perfeito entre os dados medidos e estimados, quando é 0,0 conota completa discordância entre os dados medidos e estimados. Os maiores valores apresentados foram 0,7 (Figura 16) e 0,8 (Figura 23) nas variedades RB 72 454 e SP 80-1842 respectivamente, indicativo de melhores modelos na previsão. Willmott (1981) sugere que testes de significância são inapropriados em muitas situações. Na validação, com um nível de significância (α) igual a 0,049 não há diferença estatística significativa a 5% aceitando a hipótese de frequências iguais para dados medidos e estimados. Com um valor do $\alpha = 0,051$ ocorre diferença estatística a 5% invalidando o modelo neste nível de significância, deixando evidente a necessidade na validação da análise da RQMResíduo e do índice de Willmott.

2.7.1 Modelo otimizado de planejamento agrícola de colheita

A necessidade de matéria-prima para moagem ao longo da safra requer uma metodologia capaz de prover uma base comum para comparar opções e decisões, que avalie ganhos potenciais e simultaneamente apresente estruturas de custos e restrições. Neste caso, o uso das técnicas de Pesquisa Operacional é indicado (HIGGINS; MUCHOW, 2003).

A função objetivo é maximizar o lucro da colheita sendo considerado aleatoriamente 30 áreas com ambientes homogêneos da usina sendo:

$$\begin{aligned} \text{MAX} \sum_i^I \sum_j^J \sum_k^K \sum_l^L C_{ijkl} & \left(\text{Pacu}_j \cdot \text{ATR}_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot \text{ARS}_i + \text{Palc}_j \cdot \text{PTalc}_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot \text{ARS}_i \right) \\ & - \left(\text{CI} \cdot Q_{ij} \cdot \text{ARS}_i + \text{CT}_{ik} \cdot \text{DS}_i \cdot Q_{ij} \cdot \text{ARS}_i + \text{CVT}_{ilj} \cdot Q_{ij} \cdot \text{ARS}_i \right) \end{aligned} \quad (50)$$

Sujeito a:

$$\sum_i^I C_{ijkl} = 1 \quad (51)$$

$$\sum_i^I \sum_l^L \sum_j^J C_{ijkl} \cdot Q_{ij} \cdot \text{ARS}_i \leq \text{COR}_{ilj} \quad (52)$$

$$\sum_j^J C_{ijkl} \cdot Q_{ij} \cdot \text{ARS}_i \leq \text{CAR}_j \quad (53)$$

$$\sum_i^I \sum_k^K \sum_j^J C_{ijkl} \cdot Q_{ij} \cdot \text{ARS}_i \leq \text{DISAMB}_{ikj} \quad (54)$$

onde:

C_{ijkl} = variável positiva sendo a proporção do setor homogêneo i , a ser colhido no mês j , com caminhão k , definido corte mecânico ou manual l .

Pacu_j = preço médio CEPEA/ESALQ do quilograma de açúcar cristal no mês j ,

ATR_{ij} = Açúcar Total Recuperável do setor homogêneo i , no mês j em quilograma de açúcar por tonelada de cana,

Q_{ij} = produtividade de colmos do setor homogêneo i , no mês j em tonelada de cana por hectare,

ARS_i = área do setor homogêneo i em hectares,

Palc_j = preço médio CEPEA/ESALQ do litro do álcool hidratado combustível no mês j ,

PTalc_{ij} = produtividade de álcool hidratado residual do setor homogêneo i , no mês j em litros por tonelada de cana,

CI = custo industrial de cana moída em real, variável por tonelada de cana,

CT_{ik} = custo de transporte da cana própria do setor homogêneo i , pelo caminhão k em real, variável por tonelada de cana em função da distância até a usina,

DS_i = distância do setor homogêneo i da usina em quilômetros,

CVT_{ij} = custo de corte do setor homogêneo i , com corte l e mês j em real, variável por tonelada de cana,

COR_{ij} = capacidade de corte do setor homogêneo i , com corte l no mês j em toneladas de cana,

CAR_j = capacidade de carregamento dos setores próprios no mês j em toneladas de cana incluindo a soma do corte manual e mecânico,

$DISAMB_{ikj}$ = capacidade de transporte do setor homogêneo i , com caminhão k no mês j em função do número de caminhões disponíveis, distância, viagens e velocidade média expresso em tonelada de cana.

A função objetivo de maximização do lucro representada pela equação (50), é sujeita à restrição de proporção do setor homogêneo a ser colhido pela equação (51), onde neste caso resolvemos o problema considerando a Programação Linear Simples utilizando o solver BDMLP, capaz de resolver problemas pequenos e médios tanto para Programação Linear Simples como para Programação Linear Inteira (BROOKE et al., 1998). A Programação Linear Inteira foi utilizada inicialmente na resolução do modelo, mas não conseguiu gerar uma solução ótima por exigir muita memória computacional (acima de 512 MB RAM). O uso de um processador mais veloz (acima de 1 GHz) também é recomendado.

Restrições de corte (equação 52), carregamento (equação 53) e transporte (equação 54) também foram considerados no modelo. A variável de decisão C_{ijkl} foi definida considerando os possíveis setores a serem colhidos na melhor época de corte. Desse modo, a solução ótima a ser buscada representa a melhor opção de corte dos setores para a usina e o maior lucro possível nestas condições. As restrições consideradas de área, corte, carregamento e transporte representam as maiores limitações existentes na colheita deste setores, sendo linear a relação entre as variáveis. Outras restrições podem ser incluídas no modelo em função de sua importância para a usina no corte dos setores homogêneos.

O grande problema existente no planejamento agrícola é coordenar principalmente o transporte da cana-de-açúcar do campo até a unidade industrial devido a diversos imprevistos, sendo comum em muitas usinas um descompasso entre a chegada da cana do campo e sua moagem ao longo do dia, resultando na formação de grandes filas de espera de veículos transportadores nos pátios de descarga. Esta problemática vem sendo tratada de maneira

integrada com a capacidade de colheita na tentativa de otimizar o uso dos veículos no transporte da cana (HIGGINS, 2006; HIGGINS et al., 2004; MILAN; FERNANDEZ; PLÀ, 2006), pois somente o transporte equivale a aproximadamente 12% dos custos de produção. Modelar o transporte considerando o número e tipo de caminhões disponíveis, viagens e velocidade média possível para cada setor em função da distância como feito na equação (54) não resulta na melhor solução, pois a alocação de determinado veículo varia ao longo do dia dependendo da necessidade e eficiência dos outros veículos envolvidos no sistema tratando-se de um problema de minimização do uso da frota para o transporte. Adotar algoritmos que ao mesmo tempo minimize o uso do transporte e maximize a produtividade e o lucro é a solução adequada. Nesta linha de minimização-maximização, Böse et al. (2000) propuseram algoritmos que minimizam o tempo de espera dos containeres no porto e ao mesmo tempo maximizam o uso dos guindastes. No planejamento agrícola otimizado as funções restritivas seriam de minimização dos custos de corte e transporte e maximização da produtividade e receita tornando o modelo mais complexo, porém mais representativo da realidade. Milan; Fernandez e Plà (2006) construíram um modelo de Programação Linear Inteira visando à redução dos custos de transporte rodoviário e ferroviário em cana-de-açúcar demonstrando grande eficiência na redução dos custos e planejamento diário de corte.

Sendo o objetivo do modelo de gestão buscar o lucro máximo otimizando o planejamento agrícola como um todo e não somente o transporte, a modelagem do transporte foi simplificada. Algumas unidades produtoras adotam sistemas rastreadores via-satélite onde a tomada de decisão da melhor rota e alocação é feita rapidamente ao longo do dia. Dessa forma, qualquer mudança no planejamento de transporte envolve novos cenários e nova busca do lucro máximo.

Outra dificuldade a ser solucionada é a estimativa da produtividade de colmos (Q) e álcool hidratado ($PTalc$) ao longo da safra, ressaltando que o ATR será estimado ao longo da safra 2003/2004 através do modelo PREDPOL. A produção de álcool está diretamente relacionada com a eficiência e direcionamento da fabricação industrial dependente dos preços de venda do açúcar e álcool além dos contratos de exportação de açúcar.

Dessa forma, consideraram-se somente algumas áreas de produção da unidade em função das variedades plantadas, sistematização para o corte mecânico ou manual e transporte utilizando Treminhão ou Rodotrem sendo divididas em setores homogêneos numerados consecutivamente e sem identificação por questões estratégicas, desconsiderando as áreas de reforma e mudas.

Restrições relacionadas à época de colheita de algumas variedades principalmente por problemas de brotação de soqueira, bem como os dias efetivos de trabalho na safra em função do clima foram consideradas. Custos e receitas do álcool anidro, energia elétrica, levedura, entre outros produtos não foram considerados.

O Anexo H contém a área (ha) e a distância média até a unidade (km) de cada setor homogêneo, o rendimento de colmos ($t \cdot ha^{-1}$), o ATR ($kg \cdot t^{-1}$) e o rendimento médio de álcool hidratado residual ($l \cdot t^{-1}$) ao longo dos meses atribuídos aos setores homogêneos na safra 2003/2004. O rendimento de colmos é reduzido nos meses iniciais e alcança maiores valores nos meses finais de safra. Este comportamento está associado à colheita anterior, onde diferenças na idade contribuem para esta tendência. Intervalos maiores entre a última colheita e a próxima trazem maior rendimento de colmos função principalmente do clima atuando no crescimento (HIGGINS et al., 1998; MARCHIORI, 2004). A rápida brotação de soqueira também contribui no aumento do rendimento. Colheitas tardias como nos meses de novembro e dezembro tendem na próxima safra a diminuir o rendimento de colmos principalmente quando associado à idade reduzida e corte precoce nos meses de julho e agosto (HIGGINS et al., 1998). O comportamento do ATR ao longo da safra indica sempre um pico máximo de açúcar variável com a variedade, o ambiente e o clima (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004b). Derivando estes dois fatores rendimento de colmos e ATR resulta no ponto máximo de açúcar de cada setor homogêneo. A divisão dos setores homogêneos na unidade é feita agrupando determinados ambientes (JOAQUIM et al., 1994), tendo em média 664 ha de área e distância de 12 km os setores considerados. Estimou-se o rendimento mensal de álcool hidratado residual consultando o histórico da unidade produtora e a equação do CONSECANA (2002).

Na Tabela 10 apresentamos a capacidade mensal de carregamento incluindo a soma do corte manual e mecânico (t) e os preços mensais do açúcar cristal e do álcool hidratado ($R\$ \cdot kg^{-1}$ e $R\$ \cdot l^{-1}$). Um valor mensal fixo para capacidade de carregamento foi calculado forçando a área agrícola atingir essa meta ao longo da safra. Após a resolução do modelo este valor mostrou-se possível de ser atingido podendo ser até aumentado visando o aumento do lucro. Os preços foram obtidos consultando o índice CEPEA/ESALQ. No Anexo I temos a capacidade mensal de corte dos setores homogêneos (t) em função do tipo de corte, o custo mensal do corte de cada setor homogêneo ($R\$ \cdot t^{-1}$), a capacidade de transporte (t) de acordo com o tipo de caminhão (Treminhão ou Rodotrem) e o custo do transporte de cada setor ($R\$ \cdot t^{-1}$) em função do caminhão e da

distância. O custo industrial fixado ao longo dos meses na safra foi de R\$ 13,22 por tonelada de cana processada.

Tabela 10 - Capacidade mensal de carregamento incluindo a soma do corte manual e mecânico em (t) e os preços mensais do açúcar cristal e do álcool hidratado em (R\$.kg⁻¹ e R\$.l⁻¹)

	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
CAPACIDADE CARREGAMENTO	220000	220000	220000	220000	220000	220000	220000	220000
PREÇO DO AÇÚCAR CRISTAL	0,617	0,501	0,478	0,588	0,486	0,422	0,407	0,428
PREÇO DO ÁLCOOL HIDRATADO	0,743	0,565	0,481	0,603	0,575	0,527	0,558	0,61

Analisando o cronograma otimizado de corte (Tabela 11) visualizamos que todos os 30 setores homogêneos considerados serão colhidos em sua totalidade não ocorrendo sobra de cana-de-açúcar na lavoura. Existe um padrão homogêneo de colheita ao longo da safra o que é interessante, tendo um grande aproveitamento dos bens de produção e excelente integração com a área industrial. Seguindo este cronograma de colheita teremos o lucro máximo de R\$ 56.519.745,66. Como outras despesas de produção e a receita de outros produtos não foram consideradas, este valor representa apenas o máximo retorno possível nas condições estudadas podendo ser adequada esta análise para qualquer unidade produtora. Completando, os maiores valores marginais de retorno na colheita são os meses de agosto, setembro e outubro resultado semelhante ao encontrado por Barata (1992), indicativo de vantagem econômica na moagem da cana-de-açúcar. Os meses iniciais da safra maio, junho e julho por apresentarem elevado preço do açúcar e álcool eram esperados valores marginais mais altos. Neste caso, o problema está no baixo valor inicial do ATR e na baixa produtividade de colmos sendo o uso de maturadores que pertencem ao grupo dos inibidores de crescimento e promovem uma grande alocação de sacarose para os colmos em curto período de tempo (CASTRO, 2000) e o uso de variedades precoces mais ricas, recomendados. Quando existe a necessidade de capitalização, a aplicação de maturadores permite em muitos casos antecipar o início da safra.

Ainda na Tabela 11, o manejo atual de corte de algumas variedades precoces como nos setores 4, 14, 18 e 28 é feito no início da safra e esta tendência também é confirmada pelo modelo de otimização devido às restrições impostas e por apresentar alto teor de sacarose no início da safra em comparação com as variedades médias e tardias além das recomendações dos programas de melhoramento (LANDELL et al., 2004; UFSCar, 2004), deixando estas variedades com pouca flexibilidade no manejo de corte. Desse modo, a busca de mais variedades precoces torna-se necessário, pois ainda há espaço no aumento do ganho de açúcar no início de safra como

discutido acima e evidenciado pelo modelo de otimização. No setor 7 onde se plantou uma variedade precoce, quando simulado o modelo sem as restrições de época de corte a indicação para o corte passou para os meses de setembro e outubro, diferente do recomendado para esta variedade. Consta-se que esta variedade classificada como precoce é mais vantajosa em outras épocas de corte dependendo do ambiente de produção onde foi plantada e do clima.

Setores mais distantes da unidade produtora (24 a 30) apresentaram valores marginais negativos e quando cortados reduzem o valor da função objetivo, demonstrando que acima de 20 km de distância entre os setores homogêneos considerados e a unidade produtora o transporte da cana-de-açúcar é inviável financeiramente. Para estes setores, a busca de caminhões mais eficientes com custos de transporte menores e rotas otimizadas é necessária. Abaixo de 20 km de distância há viabilidade financeira para o transporte da cana-de-açúcar. Sem as restrições das épocas indicadas para o corte, os setores 24, 25 e 26 apresentaram valores marginais positivos. Dessa forma, plantando variedades mais ricas em açúcar o prejuízo seria reduzido nos setores mais distantes da unidade produtora.

Quando realizamos a maximização sem a restrição capacidade de corte houve um aumento de 14% no valor da função objetivo e esse valor é de 26% quando retiramos a restrição capacidade de carregamento indicando que estes dois componentes da cadeia produtiva estão com menor folga, restringindo fortemente o aumento do lucro no corte dos setores considerados. A restrição capacidade de transporte está com maior folga, praticamente não alterou o valor da função objetivo. Percebemos desse modo um excesso de caminhões disponíveis para o transporte desses setores, e ao contrário, o dimensionamento de carregadoras, máquinas cortadoras e cortadores de cana-de-açúcar foi muito restritivo. Simulando um aumento de 10% na capacidade de carregamento teremos um aumento de 3% no lucro máximo, justificando a alocação de mais carregadoras para estes setores. Higgins et al. (1998) quando aumentaram a capacidade de moagem em 12% permitiram um aumento de 5% na renda líquida.

Retirando as restrições das épocas indicadas para o corte das variedades, o lucro máximo aumenta 9% em relação à tomada de decisão com as restrições impostas pelos programas de melhoramento, indicando que algumas variedades têm maiores vantagens econômicas em épocas não recomendadas. Esta decisão de acatar ou não o corte em épocas não recomendadas será respondida em testes feitos nos próprios setores onde a mudança foi recomendada, pois os maiores problemas de brotação de soqueira e idade para o corte aparecerá na próxima safra.

Tabela 11 - Cronograma otimizado de corte ao longo da safra dos setores considerados (continua)

SETOR.CAMINHÃO.CORTE	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
1.Treminhão.Manual						11905		
1.Rodotrem.Manual			903,538		12252,821	33095	29081	
2.Treminhão.Manual							61	61
2.Rodotrem.Manual					323,077	30000	29939	29939
3.Treminhão.Manual								
3.Rodotrem.Manual			25411		12951,387	30000	11954,553	
4.Treminhão.Manual	18883							
4.Rodotrem.Manual	20883	7193,24						
5.Treminhão.Manual						10044		
5.Rodotrem.Manual			23637		3029,125	31956		
6.Treminhão.Mecânico							3462	21918
6.Rodotrem.Mecânico							23918	23918
7.Treminhão.Manual	17662							
7.Rodotrem.Manual	19662	7684,92						
8.Treminhão.Mecânico		5709,02						
8.Rodotrem.Mecânico		20424			26177	4149,714		
9.Treminhão.Manual							6878	6878
9.Rodotrem.Manual						10200	23122	23122
10.Treminhão.Mecânico		12080						
10.Rodotrem.Mecânico		19920	14258,5					
11.Treminhão.Manual		5627						
11.Rodotrem.Manual		20373	20790					
12.Treminhão.Manual								
12.Rodotrem.Manual				18618	19448		5737,752	
13.Treminhão.Manual								
13.Rodotrem.Manual				20967	21965	3165,033	4256,995	1026,353
14.Treminhão.Mecânico	1844							
14.Rodotrem.Mecânico	16156	16303,6						
15.Treminhão.Mecânico			2865					
15.Rodotrem.Mecânico			19135	8529,34	21841,936			
16.Treminhão.Manual								
16.Rodotrem.Manual				28681	29000	11517,61		
17.Treminhão.Manual			8731					
17.Rodotrem.Manual			18269	18819				
18.Treminhão.Manual	18448							
18.Rodotrem.Manual	20448	5402						
19.Treminhão.Mecânico			655					
19.Rodotrem.Mecânico			21345	13252,3	22000			
20.Treminhão.Manual								11914
20.Rodotrem.Manual						12010	23086	23086
21.Treminhão.Manual	4696							
21.Rodotrem.Manual	20304	16791,7						

Tabela 11 - Cronograma otimizado de corte ao longo da safra dos setores considerados
(conclusão)

SETOR.CAMINHÃO.CORTE	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
22.Treminhão.Manual		1509	548					
22.Rodotrem.Manual		19491	20452	4128				
23.Treminhão.Manual								271
23.Rodotrem.Manual				11647,1			20729	20729
24.Treminhão.Mecânico		1212	230					
24.Rodotrem.Mecânico		18788	19770	3358,21				
25.Treminhão.Mecânico								
25.Rodotrem.Mecânico			23000	23000	7011,655			23000
26.Treminhão.Manual								
26.Rodotrem.Manual				22000	22000	22000		11037,647
27.Treminhão.Manual								
27.Rodotrem.Manual				22000	22000	9957,647	22000	
28.Treminhão.Manual	17868							
28.Rodotrem.Manual	19868	7871,23						
29.Treminhão.Manual				2092				
29.Rodotrem.Manual				22908			15774,699	23100
30.Treminhão.Mecânico	2858	667,667						
30.Rodotrem.Mecânico	19142	20154						
TOTAL	218722	207201	220000	220000	220000	220000	220000	220000

Para mudar a forma empírica na tomada de decisão de corte e implantar o uso deste modelo de planejamento otimizado, a unidade produtora deve fornecer todos os custos envolvidos além de concordar com o processo de implantação que envolve o levantamento de dados da área agrícola, industrial e financeira. Auditorias feitas anteriormente nestas áreas podem nortear quais os passos a serem seguidos sempre visando à otimização. Higgins et al. (1998) citam que a rentabilidade é influenciada pelos altos custos de moagem, colheita, transporte e armazenamento, onde a otimização destes fatores resulta em 8% de aumento na rentabilidade comparado a prática sem o uso da otimização ou empírica de decisão.

Além da tomada de decisão de corte, a Programação Linear pode ser uma ferramenta de auxílio na alocação de variedades considerando os diversos ambientes de produção, distribuição das turmas de corte, alocação dos caminhões para o transporte (HIGGINS, 2006) e reforma de canaviais (BARATA, 1992; CRANE et al. 1982).

Em termos de trabalhos futuros, a inclusão de um modelo de previsão da produtividade será considerada uma vez que os dados utilizados se referem a uma safra já realizada e o interessante no planejamento é a obtenção de valores futuros e sobre estes realizar a otimização. Sem utilizar

ferramentas eficientes na previsão de rendimentos, a aplicação de softwares de gestão no planejamento estratégico pode resultar em soluções pouco realistas, pois a média não representa o que ocorre em uma safra, principalmente na maturação da cana-de-açúcar (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2004a).

3 CONCLUSÕES

Os modelos de previsão da maturação na cana-de-açúcar considerando o armazenamento de água disponível no solo, os graus-dia negativos e a quantidade de carboidratos assimilados tem a qualidade e a precisão necessária para ser utilizado como um indicador em estudos de planejamento, apresentando uma melhoria no processo decisório usado no planejamento da lavoura de cana, uma vez que a previsão da maturação é baseada na média das safras sem considerar a influência do clima.

Os modelos de previsão simulam adequadamente a curva de maturação principalmente a queda do ATR nos meses de setembro e outubro em diante.

Existe grande variabilidade espacial do índice de área foliar nas áreas estudadas, devendo ser considerada na modelagem da interceptação da radiação solar para cana-de-açúcar em trabalhos futuros principalmente em áreas declivosas.

O uso de valores variáveis do coeficiente de extinção em modelos de cultura é recomendado, melhorando a simulação da interceptação da radiação solar, minimizando erros na estimativa da produtividade de diferentes variedades.

O planejamento de colheita otimizado promoveu uma distribuição homogênea da matéria-prima ao longo dos meses de safra obtendo o máximo lucro possível, integrando de forma satisfatória as áreas agrícola e industrial.

A modelagem do transporte não reproduz fielmente o que ocorre na lavoura canavieira exigindo uma análise mais complexa, tratando o problema de forma não-linear e de minimização de custos.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**: a comprehensive study of the *Saccharum* source-to-sink system. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752 p.
- ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C.; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 653-659, 2000.
- AMTHOR, J.S. The McCree-de Wit-Penning de Vries-Thornley Respiration paradigms: 30 years later. **Annals of Botany**, Oxford, v. 86, p. 1-20, 2000.
- ASHTON, F.M. Effects of a series of cycles of alternating low and high soil water contents on rate of apparent photosynthesis in sugar cane. **Plant Physiology**, Rockville, v. 31, p. 266-274, 1956.
- BACCHI, O.O.S.; SOUSA, G.C. Minimum threshold temperature for sugarcane growth. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGARCANE TECHNOLOGISTS., 16., 1977. São Paulo, **Proceedings ...** São Paulo: ISSCT, 1977. p. 1733-1741.
- BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, New York, v. 142, p. 297-305, 1992.
- BARATA, M.Q.F. **Otimização econômica do corte e reforma de canaviais**. 1992. 124 p. Dissertação (Mestrado em Economia e Administração Rural) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.
- BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. 1993. 142 p. Tese (Doutorado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.
- BARBIERI, V. **Modelagem dos efeitos das deficiências hídricas no rendimento agrícola das culturas**. Piracicaba: ESALQ, 2000. 20 p.
- BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: PLANALSUCAR.- Coordenadoria Regional Sul - COSUL. **Climatologia**. Araras: Planalsucar, 1977. p.1-22.
- BARBIERI, V.; BACCHI, O.O.S.; VILLA NOVA, N.A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró. **Anais ...** Mossoró: SB Agro, 1979. p. 192-197.
- BARBIERI, V.; TERUEL, D.A.; SILVA, J.G. da; SANTOS, R.M.N. dos. Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather modificado para estimativa de deficiências nas culturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997. Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: SB Agro, 1997. p. 587-589.

BEAUCLAIR, E.G.F. de. Planejamento e estimativa na produção de cana. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, p. 24-27, 2004.

BEAUCLAIR, E.G.F. de; PENTEADO, C.R. Cronograma de corte da cana-de-açúcar através da Programação Linear. In: SEMINÁRIO DA TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 2., 1984. Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1984. p. 424-434.

BEAUCLAIR, E.G.F. de; SCARPARI, M.S. Modelo de previsão de acúmulo de sacarose para a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) através de parâmetros climáticos. In: CONGRESSO NACIONAL DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002. Recife. **Anais ...** Recife: STAB, 2002. p. 561-565.

BERDING, N.; HURNEY, A.P. Flowering and lodging, physiological-based traits affecting cane and sugar yield. What do we know of their control mechanisms and how do we manage them? **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 261-275, 2005.

BERDING, N.; MOORE, P.H. Advancing from opportunistic sexual recombination in sugarcane: Lessons from tropical photo-periodic research. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 24., 2001, Brisbane. **Proceedings ...** Brisbane: ISSCT, 2001. p. 482-487.

BEZUIDENHOUT, C.N. **A model review and proposed mechanistic tiller model for the CANEGRO sugarcane crop model**. Durban. 2000. 78 p. M.Tech. (thesis) - Technikon Natal, Durban, 2000.

BEZUIDENHOUT, C.N.; SINGELS, A. Operational forecasting of South African sugarcane production: Part 1 – System description. **Agricultural Systems**, Essex, v. 92, p. 23-38, 2007.

BEZUIDENHOUT, C.N.; LECLER, N.L.; GERS, C.; LYNE, P.W.L. Regional based estimates of water use for commercial sugar-cane in South Africa. **Water SA**, Gezina, v. 32, n. 2, p. 219-222, 2006.

BIRCH, C.J.; ANDRIEU, B.; FOURNIER, C.; VOS, J.; ROOM, P. Modelling kinetics of plant canopy architecture-concepts and applications. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 19, p. 519-533, 2003.

BÖSE, J.; REINERS, T.; STEENKEN, D.; VOß, S. Vehicle dispatching at seaport container terminals using evolutionary algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES., 33., 2000, Wailea Maui. **Proceedings ...** Wailea Maui: HICSS, 2000. p. 1-10.

BOOTE, K.J.; PICKERING, N.B. Modeling photosynthesis of row crop canopies. **HortScience**, Alexandria, v. 29, p. 1423-1434, 1994.

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.

BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A.; RAMAN, R. **GAMS: a user's guide**. San Francisco: The Scientific Press, 1998. 262 p.

BRUNORO, J.A.B.; LEITE, C.A.M. Escolha ótima de variedade de cana-de-açúcar por meio da programação matemática. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 46, n. 264, p. 111-124, 1999.

BULL, T.A. The taxonomic significance of quantitative morphological characters and physiological studies in *Saccharum*. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGARCANE TECHNOLOGISTS., 12., 1967, San Juan. **Proceedings ...** San Juan: ISSCT, 1967. p. 985-994.

BULL, T.A. Photosynthesis efficiencies and photorespiration in Calvin cycle and C4 dicarboxylic and plants. **Crop Science**, Madison, v. 9, p. 726-729, 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.

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

CAMPBELL, G.S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. **Agricultural and Forest Meteorology**, Oxford, v. 36, p. 317-321, 1986.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.

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

CASTRO, P.R.C. Utilização de reguladores vegetais no sistema de produção da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FISIOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2000, Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: STAB, 2000. p. 1-10.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. Piracicaba, 2002. 117 p.

COOPERATIVA CENTRAL DOS PRODUTORES DE AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Sexta geração de variedades de cana-de-açúcar Copersucar**. Piracicaba, 1997. 27 p. (COPERSUCAR. Boletim Técnico. Edição Especial).

CRANE, D.R.; SPREEN, T.H.; ALVAREZ, J.; KIDDER, G. **An analysis of the stubble replacement decision for Florida sugarcane growers**. Gainesville: University of Florida, 1982. 74 p.

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

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos.** Roma: FAO, 1979. 212 p. (Riego y Drenaje, 33).

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

DU, Y.-C.; NOSE, A.; WASANO, K. Effects of chilling temperature on photosynthetic rates, photosynthetic enzyme activities and metabolism levels in leaves of three sugarcane species. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 22, p. 317-324, 1999.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília, 1999. 412 p.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Concepts for using modeling as a research tool.** Washington: USDA, Agricultural Research Service, 1978. 18 p.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La caña de azúcar.** Barcelona: Editorial Blume, 1975. 433 p.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. Cana-de-açúcar. In: _____. **Agriannual 2006: anuário da agricultura brasileira.** São Paulo: 2006. p.241-242.

FOSKET, D. E. **Plant growth and development.** New York: Academic Press, 1994. 580 p.

GLASZIOU, K.T.; GAYLER, K.R. Storage of sugars in stalks of sugarcane. **The Botanical Review**, New York, v. 38, p. 471-490, 1972.

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

GLOVER, J. The simultaneous growth of sugarcane roots and tops in relation to soil and climate. In: SOUTH AFRICAN SUGARCANE TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION., 41., 1967, Mount Edgecombe. **Proceedings ...** Mount Edgecombe: SASTA, 1967. p. 143-159.

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., 45., 1971, Mount Edgecombe. **Proceedings ...** Mount Edgecombe: SASTA, 1971. p. 158-164.

- GLOVER, J. Practical and theoretical assessments of sugarcane yield potential in Natal. In: SOUTH AFRICAN SUGARCANE TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION., 46., 1972. Mount Edgecombe. **Proceedings...** Mount Edgecombe: SASTA, 1972. p. 138-141.
- GLOVER, J. The rate of apparent photosynthesis of whole sugar-cane plants. **Annals of Botany**, Oxford, v. 38, p. 909-920, 1974.
- GOSNELL, J.M. Some factors affecting flowering in sugarcane. In: SOUTH AFRICAN SUGARCANE TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION., 47., 1973, Mount Edgecombe. **Proceedings ...** Mount Edgecombe: SASTA, 1973. p. 144-147.
- GOUDRIAAN, J. The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, Oxford, v. 43, p. 155-169, 1988.
- 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.
- GROF, C.P.L.; CAMPBELL, J.A. Sugarcane sucrose metabolism: scope for molecular manipulation. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 28, p. 1-12, 2001.
- HANSEN, J.W.; JONES, J.W. Scaling-up crop models for climate variability applications. **Agricultural Systems**, Essex, v. 65, p. 43-72, 2000.
- HARTT, C.E.; BURR, G.O. Factors affecting photosynthesis in sugarcane. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGARCANE TECHNOLOGISTS., 12., 1967, San Juan. **Proceedings ...** San Juan: ISSCT, 1967. p. 590-609.
- HATCH, M.D. C₄ photosynthesis: discovery and resolution. **Photosynthesis Research**, New York, v. 73, p. 251-256, 2002.
- HATCH, M.D.; GLASZIOU, K.T. Sugar accumulation cycle in sugarcane. II. Relationship of invertase activity to sugar content on growth tissue of plants grown in controlled environments. **Plant Physiology**, Rockville, v.38, p.344-348, 1963.
- HIGGINS, A. Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.170, p.987-1000, 2006.
- HIGGINS, A.J.; MUCHOW, R.C. Assessing the potential benefits of alternative cane supply arrangements in the Australian sugar industry. **Agricultural Systems**, Essex, v. 76, p. 623-638, 2003.
- HIGGINS, A.J.; HAYNES, M.A.; MUCHOW, R.C.; PRESTWIDGE, D.B. Developing and implementing optimised sugarcane harvest schedules through participatory research. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 55, p. 297-306, 2004.

HIGGINS, A.J.; MUCHOW, R.C.; RUDD, A.V.; FORD, A.W. Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 57, p.153-162, 1998.

HIGGINS, A.; ANTONY, G.; SANDELL, G.; DAVIES, I.; PRESTWIDGE, D.; ANDREW, B. A framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. **Agricultural Systems**, Essex, v. 82, p. 99-115, 2004.

HOFFMAN, R.; VIEIRA, S. **Análise de regressão: uma introdução a econometria**. São Paulo: Hucitec, 1977. 379 p.

HORTON, P. Prospects for crop improvement through the genetic manipulation of photosynthesis: morphological and biochemical aspects of light capture. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 51, p. 475-485, 2000.

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

IAIA, A.M.; LEE, T.S.G.; MATSUOKA, S.; PARAZZI, C.; FERRARI, S.E.; BARBIERI, V. Efeito do florescimento no rendimento e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 103, n. 4/6, p. 18-25, 1985.

IHAKA, R.; GENTLEMAN, R.R. A Language for Data Analysis and Graphics. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, Alexandria, v.5, p.299-314, 1996.

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

INMAN-BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N.G. History of the Canegro model. In: INTERNATIONAL CANEGRO WORKSHOP, 2000. Mount Edgecombe. **Proceedings ...** Mount Edgecombe: SASTA, 2000. p. 5-8.

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

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

INMAN-BAMBER, N.G.; McGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 83, p. 125-138, 2003.

INMAN-BAMBER, N.G.; CULVERWELL, T.L.; McGLINCHEY, M.G. Predicting yield responses to irrigation of sugarcane using a growth model and field records. In: SOUTH

AFRICAN SUGARCANE TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION., 67., 1993, Mount Edgecombe. **Proceedings ...** Mount Edgecombe: SASTA, 1993. p. 66-72.

INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J. Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, p. 71-84, 2002.

IRVINE, J.E. Photosynthesis and stomatal behavior in sugarcane leaves as affected by light intensity and low air flow rates. **Physiology Plantarum**, Copenhagen v. 24, p. 436-440, 1971.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWZKI, T.T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1968. p. 1-22.

JOAQUIM, A.C.; BELLINASSO, I.F.; DONZELLI, J.L.; QUADROS, A.C.; BARATA, M.Q.F. Potencial e manejo de solos cultivados com cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DA TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 6., 1994, Piracicaba. **Anais ...** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1994. p. 1-10.

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

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, p. 235-265, 2003.

KARMAKAR, N.K. A new polynomial-time algorithm for linear programming. **Combinatorica**, Budapest, v. 4, p. 372-395, 1984.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production systems. 1. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3, p. 253-271, 1999.

KORNDÖRFER, G.H.; PRIMAVESI, O.; DEUBER, R. Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA. **Boletim Técnico Copersucar**, Piracicaba, n. 47, p. 32-36, 1989.

LACLAU, P.R.F.B. **Balanço hídrico e crescimento de raízes da cana-de-açúcar sob disponibilidade de água contrastante comparados ao modelo MOSICAS**. 2005. 123p. Dissertação (Mestrado na área de Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P.; FIGUEIREDO, P.; SILVA, M.A.; VASCONCELOS, A.C.M.; BIDOIA, M.A.P.; XAVIER, M.A.; DINARDO-MIRANDA, L. L.; PRADO, H.; ROSSETO, R.; SANTOS, A.S.; CAVICHIOLI, J.C.; MARTINS, A.L.M.; KANTHACK, R.A.D.; GALLO, P.B.; VEIGA FILHO, A.A.; SILVA, D.N. **Variedades de cana-de-açúcar para o centro-sul do Brasil**. Campinas: Instituto Agrônômico - IAC, 2004. 32 p. (Boletim Técnico, 195).

LAWES, R.A.; LAWN, R.J. Applications of industry information in sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 353-363, 2005.

LEME, E.J.A.; MANIERO, M.A.; GUIDOLIN, J.C. Estimativa da área foliar da cana-de-açúcar. **Cadernos Planalsucar**, Piracicaba, n. 2, p. 3-9, 1984.

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

LIU, D.L.; KINGSTON, G.; BULL, T.A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperatures regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Oxford, v. 90, p. 119-139, 1998.

LOOMIS, R.S.; AMTHOR, J.S. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. **Crop Science**, Madison, v. 39, p. 1584-1596, 1999.

MACHADO, E.C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria-seca na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1981. 115 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1981.

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

MARCHIORI, L.F.S. **Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar**. 2004. 277 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MARCHIORI, L.F.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. de; PIEDADE, S.M.S.; SCARPARI, M.S.; TARDIVO, J.C. Plantio de cana inteira ou picada na cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 24, n. 3, p. 28-31, 2006.

MATSUOKA, S.; ARIZONO, H.; BASSINELLO, A.I.; GARCIA, A.A.F.; GHELLER, A.C.A.; GIGLIOTTI, E.A.; HOFFMANN, H.P.; MASUDA, Y. **Seis novas variedades RB de cana-de-açúcar**. Araras: UFSCar, CCA, 1998. 24 p.

MCCOWN, R.L.; HAMMER, G.L.; HARGREAVES, J.N.G.; HOLZWORTH, D.P.; FREEBAIRN, D.M. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. **Agricultural Systems**, Essex, v.50, p.255-271, 1996.

MEDINA, E.; SAN JOSE, J.J.; SEQUERA, P.E. Análisis de la productividad en caña de azúcar. III. Respiración en la oscuridad de hojas y tallos de cinco variedades de caña de azúcar y pérdidas nocturnas de materia seca. **Turrialba**, San Jose, v. 20, p. 302-306, 1970.

MILAN, E.L.; FERNADEZ, S.M.; PLÀ, L.M. Sugar cane transportation in Cuba, a case study. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.174, p. 374-386, 2006.

- MISHOE, J.W.; JONES, J.W.; GASCHO, G.J. Harvesting scheduling of sugarcane for optimum biomass production. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 22, p. 1299-1304, 1979.
- MITCHELL, P.L. Misuse of regression for empirical validation of models. **Agricultural Systems**, Essex, v. 54, p. 313-326, 1997.
- MONSI, M.; SAEKI, T. Uber den lichtfaktor in den pflanzen-gesell-schaften und seine bedeutung fur die Stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, Tokyo, v. 14, p. 22-52, 1953.
- MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **The Journal of Applied Ecology**, Oxford, v. 9, n. 3, p. 747-766, 1972.
- MOORE, P.H. Physiology and control of flowering. In: COPERSUCAR INTERNATIONAL SUGARCANE BREEDING WORKSHOP, 1987, Piracicaba. **Proceedings ... Piracicaba: Copersucar**, 1987. p. 103-127.
- MUCHOW, R.C.; CARBERRY, P.S. Environmental control of phenology and leaf growth in tropically adapted maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, p. 221-236, 1989.
- MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. II. Sucrose accumulation and commercial yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 27-36, 1996.
- MUCHOW, R.C.; EVENSEN, C.I.; OSGOOD, R.V.; ROBERTSON, M.J. Yield accumulation in irrigated sugarcane: II. Utilization of intercepted radiation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 646-652, 1997.
- MUETZELFELDT, R.; MASSHEDER, J. The Simile visual modelling environment. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 345-358, 2003.
- MURCHIE, E.H.; CHEN, Y.; HUBBART, S.; PENG, S.; HORTON, P. Interactions between senescence and leaf orientation determine in situ patterns of photosynthesis and photo inhibition in field-grown rice. **Plant Physiology**, Rockville, v. 119, p. 553-563, 1999.
- NAGELKERKE, N.J.D. A note on a general definition of the coefficient of determination. **Biometrika**, Oxford, v. 78, p. 691-692, 1991.
- NOGUEIRA, F.T.S.; DE ROSA Jr., V.E.; MENOSSI, M.; ULIAN, E.C.; ARRUDA, P. RNA expression profiles and data mining of sugarcane response to low temperature. **Plant Physiology**, Rockville, v. 132, p. 1811-1824, 2003.
- 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.

ORESQUES, N.; SHRADER-FRECHETTE, K.; BELITZ, K. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. **Science**, Washington, v. 263, p. 641-646, 1994.

PENNING DE VRIES, F.W.T.; BRUNSTING, A.H.M.; VAN LAAR, H.H. Products, requirements and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach. **Journal of Theoretical Biology**, Amsterdam, v. 45, p. 339-377, 1974.

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

PEREIRA, A.R.; BARBIERI, V.; MANIERO, M.A. Condicionamento climático da indução ao florescimento em cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 4, n. 6, p. 56-59, 1986.

PERES, L.E.P.; KERBAUY, G.B. Controle hormonal do desenvolvimento das raízes. **Universa**, Brasília, v. 8, p. 181-195, 2000.

PRADO, H.; LANDELL, M.G.A.; ROSSETTO, R. A importância do conhecimento pedológico nos ambientes de produção de cana-de-açúcar. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E ÁGUA., 14., 2002. Cuiabá. **Anais ...** Cuiabá: SBCS, 2002. 1 CD-ROM.

RAE, A.L.; GROF, C.P.L.; CASU, R.E.; BONNETT, G.D. Sucrose accumulation in the sugarcane stem: pathways and control points for transport and compartmentation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 159-168, 2005.

RHODES, I. Relationship between canopy structure and productivity in herbage grasses and its implications for plant breeding. **Herbage Abstracts**, Wallingford, v. 43, p. 129-133, 1973.

RIBEIRO Jr., P.J.; DIGGLE, P.J. geoR: a package for geostatistical analysis. **R-NEWS**, Wien, v. 1, p. 15-18, 2001.

RITCHIE, J.T. A user-orientated model of the soil water balance of wheat. In: DAY, W.; ATKINS, R.K. (Ed.). **Wheat growth and modeling**. New York: Plenum, 1989. p. 293-305.

ROBBINS, J.L.; DANEMAN, J.C. Parametric estimating & the stepwise statistical technique. **National Estimator**, Alexandria, v. 14, n. 27, p. 24-34, 1999.

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

ROBERTSON, M.J.; BONNETT, G.D.; HUGHES, R.M.; MUCHOW, R.C.; CAMPBELL, J.A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, p. 819-828, 1998.

RÖHRIG, M.; STÜTZEL, H.; ALT, C. A three-dimensional approach to modeling light interception in heterogeneous canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, p. 1024-1032, 1999.

ROHWER, J.M.; BOTHA, F.C. Analysis of sucrose accumulation in the sugarcane culm on the basis of in vitro kinetic data. **Biochemical Journal**, Essex, v. 358, p. 437-445, 2001.

ROWLINGSON, B.; DIGGLE, P. Splancs: spatial point pattern analysis code in S-Plus. **Computers and Geosciences**, Ottawa, v. 19, p. 627-655, 1993.

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

SAS INSTITUTE. **SAS Language and procedures**: usage, version 6. Cary, 1989. 638 p.

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.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. de. Estimativa da maturação e otimização da cana-de-açúcar. **NOTESALQ**, Piracicaba, v. 13, n. 8, p. 8, 2004a.

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

SHENK, A. **Cálculo e geometria analítica**. Tradução de A.A.F. Barroso. Rio de Janeiro: Campus, 1991. 496 p.

SINCLAIR, T.R.; MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**, Linn, v. 65, p. 215-265, 1999.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G. Criteria for publishing papers on crop modeling. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 165-172, 2000.

SINCLAIR, T.R.; GILBERT, R.A.; PERDOMO, R.E.; SHINE JR., J.M.; POWELL, G. MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 171-178, 2004.

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

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 291-303, 2005.

SPIEGEL, M.R. **Estatística**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1972. 580 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Berkeley: The Benjamin/Cummings Publ., 1998. 559 p.

TERUEL, D.A. **Modelagem do índice de área foliar da cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos**. 1995. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

TERUEL, D.A.; BARBIERI, V.; FERRARO JUNIOR, L. A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, n. esp., p. 39-44, 1997.

THOMAS, H.; HOWARTH, C.J. Five ways to stay green. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 51, p. 329-337, 2000.

THOMPSON, G.D. Water use by sugarcane. **South African Sugar Journal**, Mount Edgecombe, n. 8, p. 593-600, p. 627-635, 1976.

THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology**. London: Academic Press, 1976. 318 p.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 669 p.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Centertown, 1955. 104 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. Disponível em: <<http://pmgca.dbv.ufscar.br/Infopublica/catalogo>>. Acesso: 29 abr. 2004.

VAN ANTWERPEN, R. Sugarcane root growth and relationships to above-ground biomass. In: SOUTH AFRICAN SUGARCANE TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION., 73., 1999, Mount Edgecombe. **Proceedings ...** Mount Edgecombe: SASTA, 1999. p. 89-95.

VAN ANTWERPEN, R.; MEYER, J.H.; INMAN-BAMBER, N.G. Cane root development and crop modelling. In: SOUTH AFRICAN SUGARCANE TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION., 67., 1993, Mount Edgecombe. **Proceedings ...** Mount Edgecombe: SASTA, 1993. p. 73-77.

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

VAN HEEMST, H.D.J. Crop phenology and dry matter distribution. In: VAN KEULEN, H.; WOLF, J. (Ed.). **Modelling of agricultural production: weather, soils and crops**. Wageningen: PUDOC, 1986. p. 27-40.

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.

VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2002.

VENABLES, W.N.; RIPLEY, B.D. **Modern applied statistics with S**. New York: Springer, 2002. 512 p.

WAGNER, H.M. **Pesquisa operacional**. Tradução de P.A. Mariotto. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1986. 851 p.

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

WATSON, D.J. Comparative physiological studies on growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, Oxford, v. 11, p. 41-76, 1947.

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

WILLMOTT, C.J. On the validation of model. **Physical Geography**, Madison, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

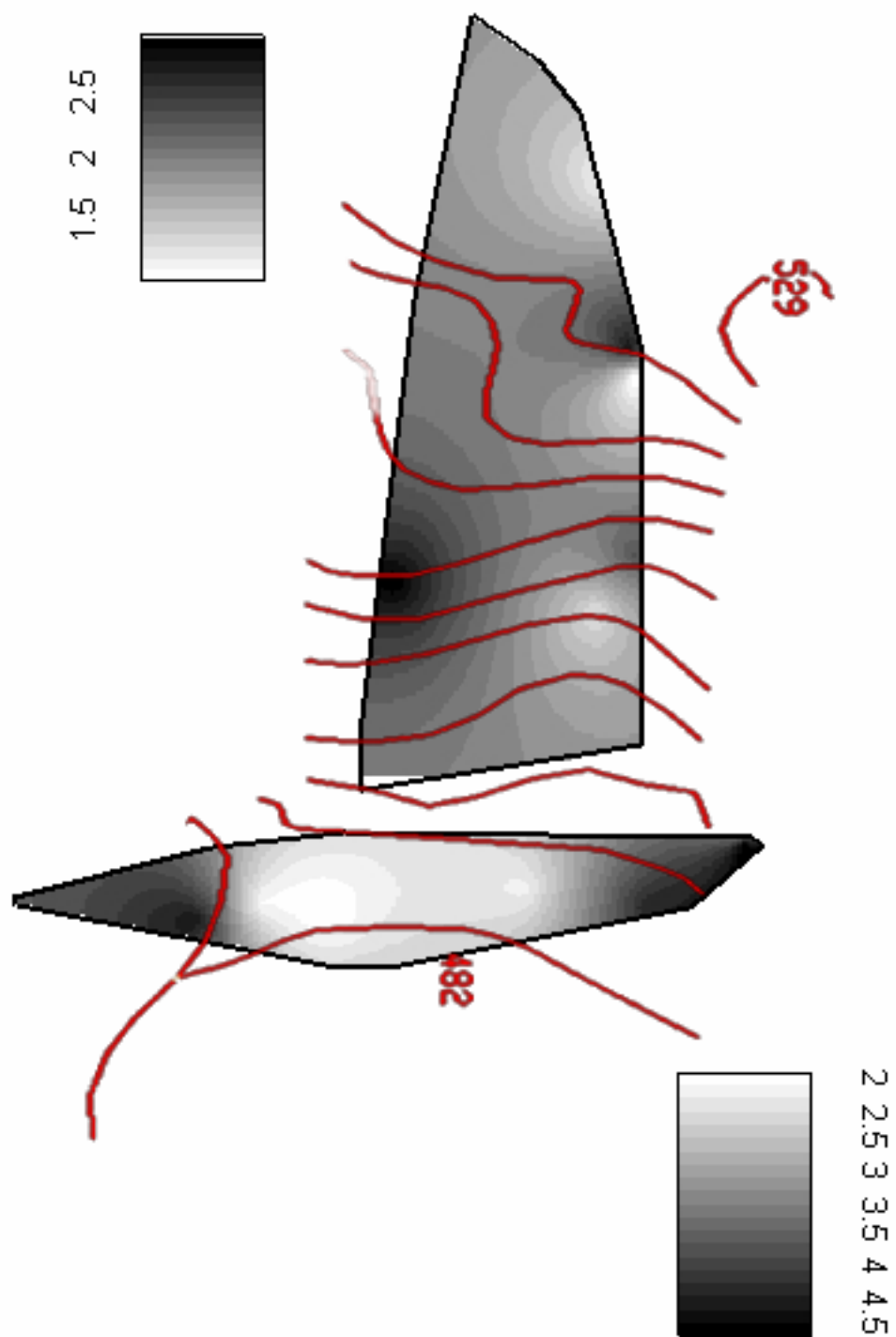
WIT, C.T. de; GOUDRIAAN, J. **Simulation of ecological processes**. Wageningen: The Netherlands Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1974. 159 p.

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

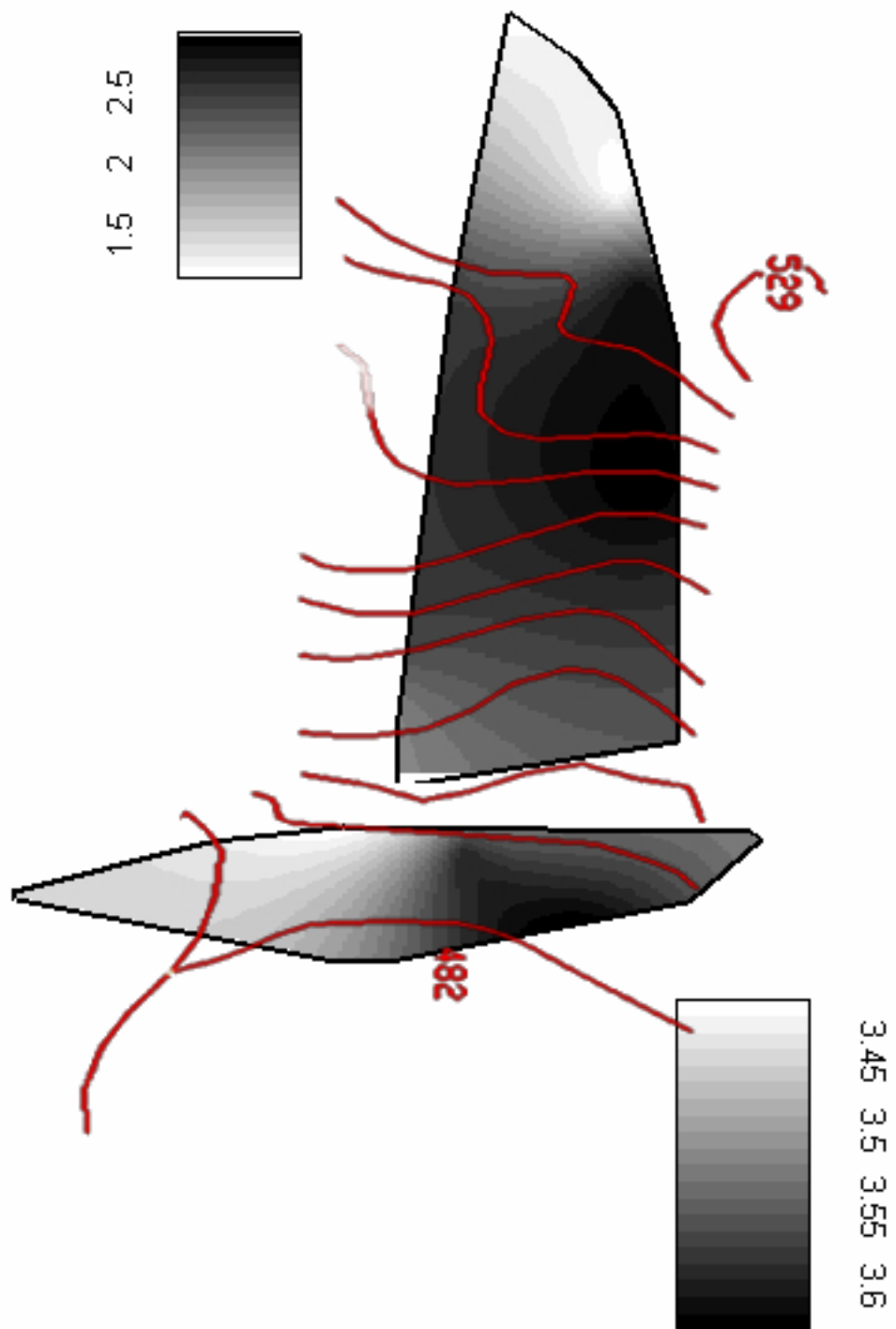
ZHOU, M.; SINGELS, A.; SMIT, M. Physiological parameters for modelling varietal differences in sugarcane canopy development in the south east lowveld of Zimbabwe. In: SOUTH AFRICAN SUGARCANE TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION, 77., 2003, Mount Edgecombe. **Proceedings ...** Mount Edgecombe: SASTA, 2003. p. 32-40.

ANEXOS

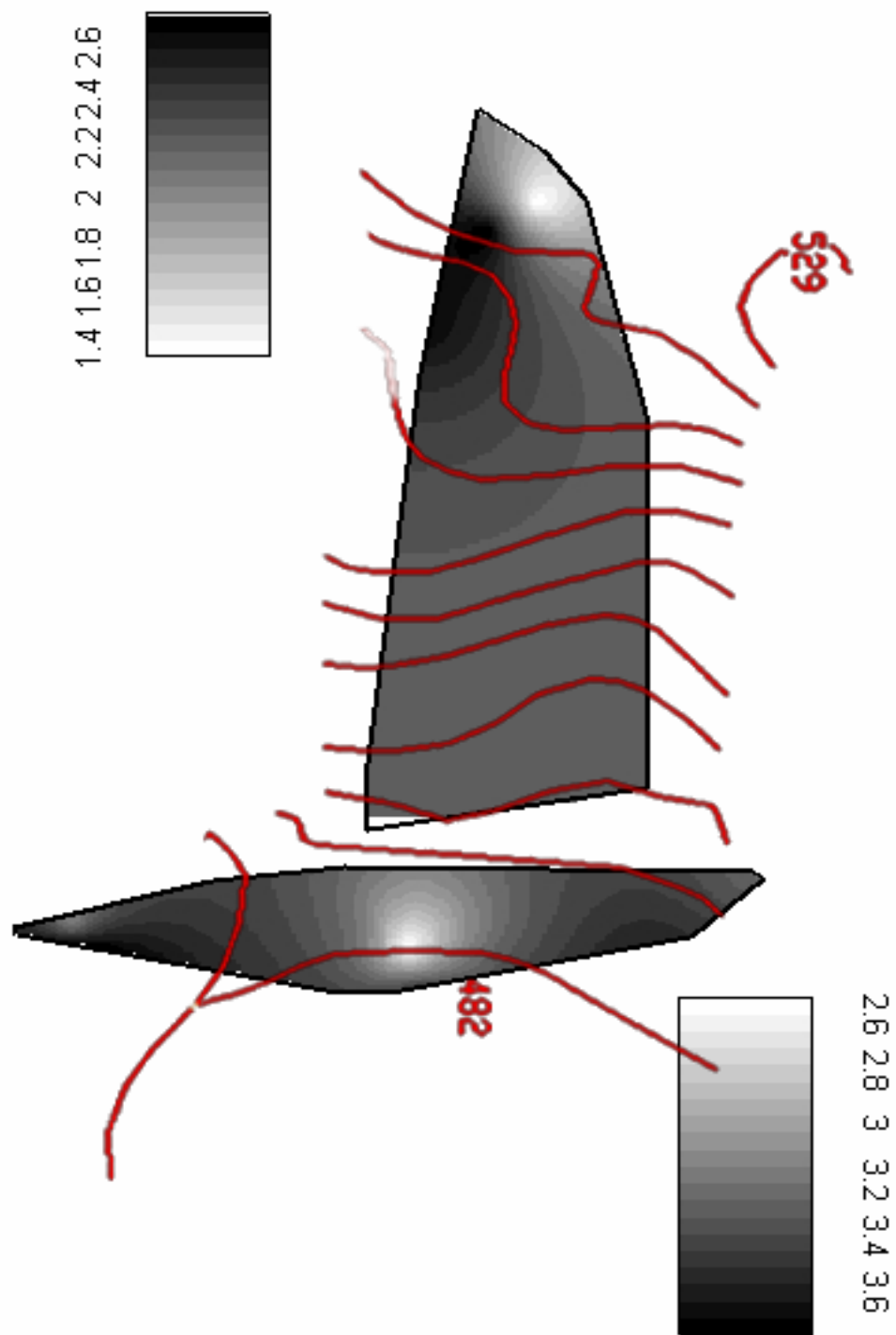
Anexo A - Variabilidade espacial do IAF das variedades RB 85 5156 (área maior) e SP 80-3280 (área menor) avaliada no dia 03/03/2004 com as respectivas legendas ao lado das áreas



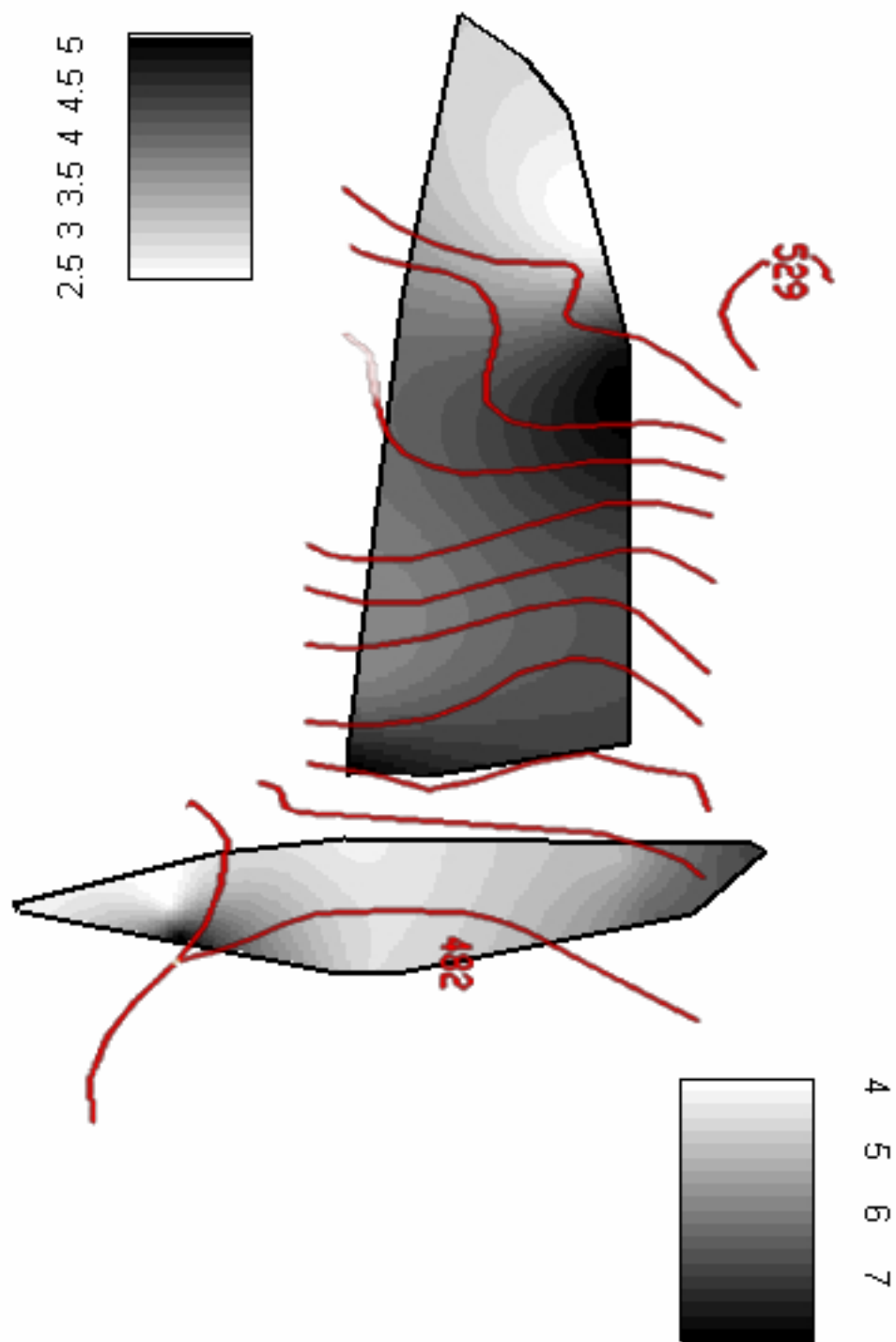
Anexo B - Variabilidade espacial do IAF das variedades RB 85 5156 (área maior) e SP 80-3280 (área menor) avaliada no dia 29/04/2004 com as respectivas legendas ao lado das áreas



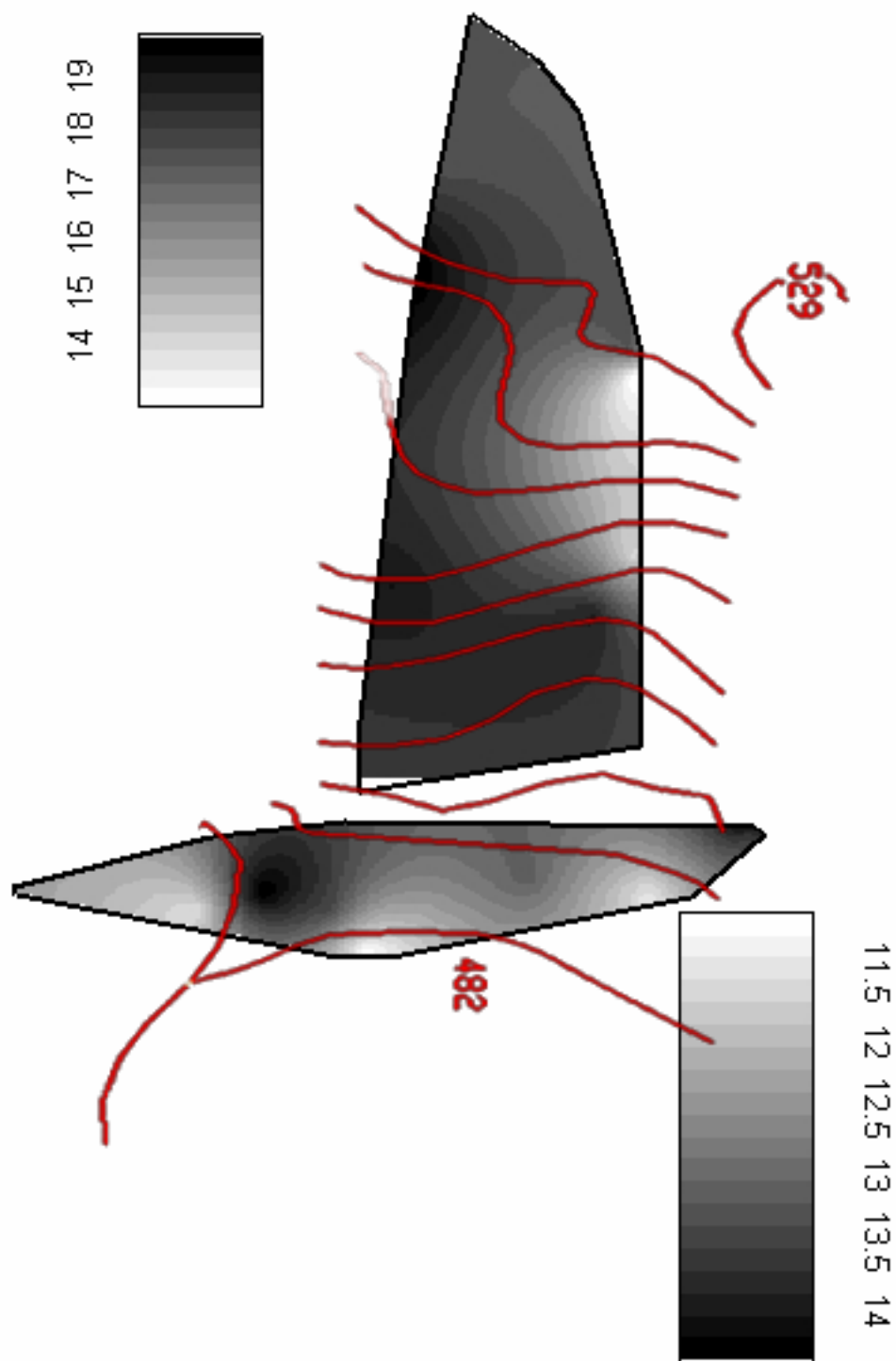
Anexo C - Variabilidade espacial do IAF das variedades RB 85 5156 (área maior) e SP 80-3280 (área menor) avaliada no dia 01/06/2004 com as respectivas legendas ao lado das áreas



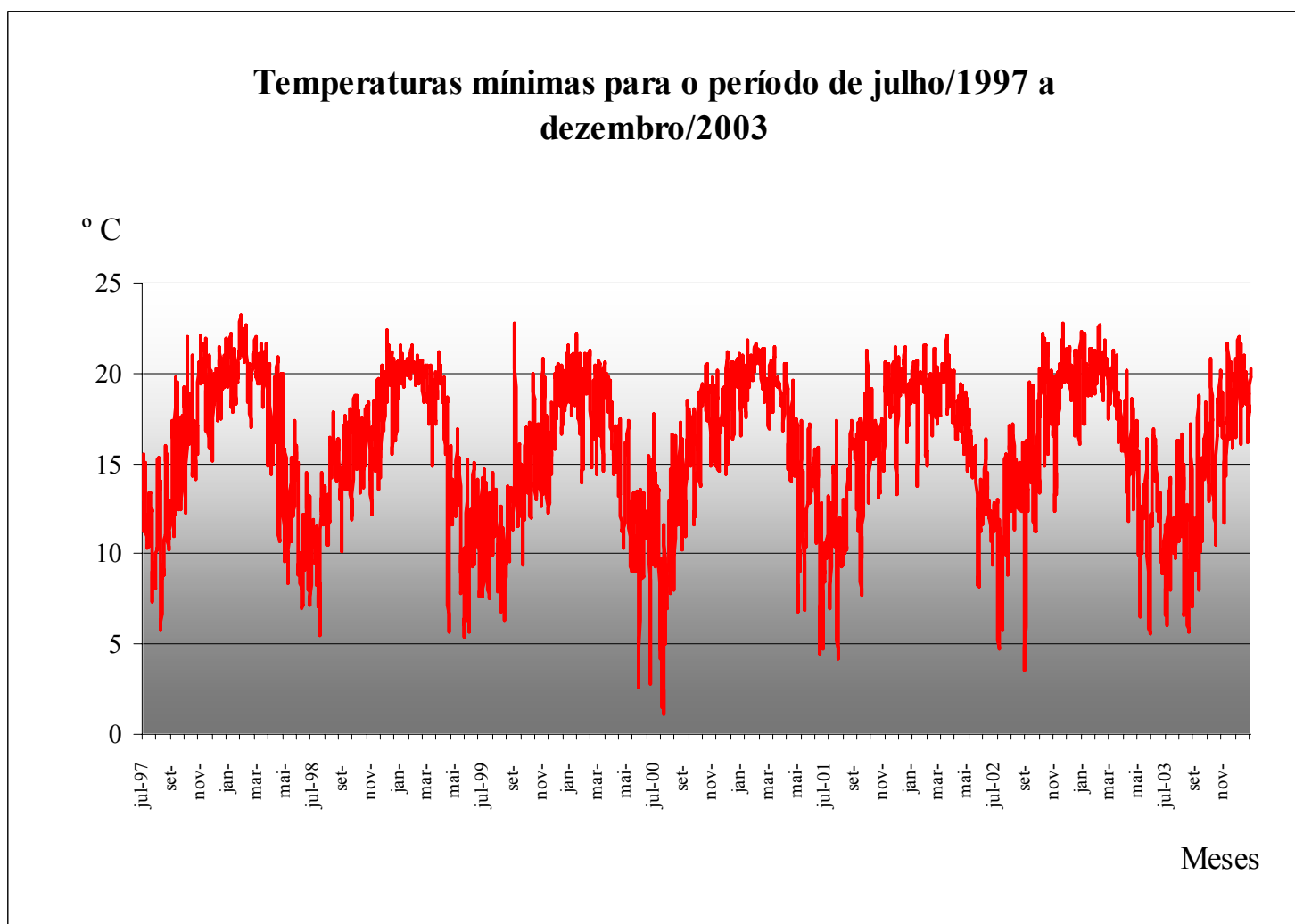
Anexo D - Variabilidade espacial do IAF das variedades RB 85 5156 (área maior) e SP 80-3280 (área menor) avaliada no dia 25/08/2004 com as respectivas legendas ao lado das áreas



Anexo E - Variabilidade espacial do Brix das variedades RB 85 5156 (área maior) e SP 80-3280 (área menor) avaliada no dia 29/04/2004 com as respectivas legendas ao lado das áreas

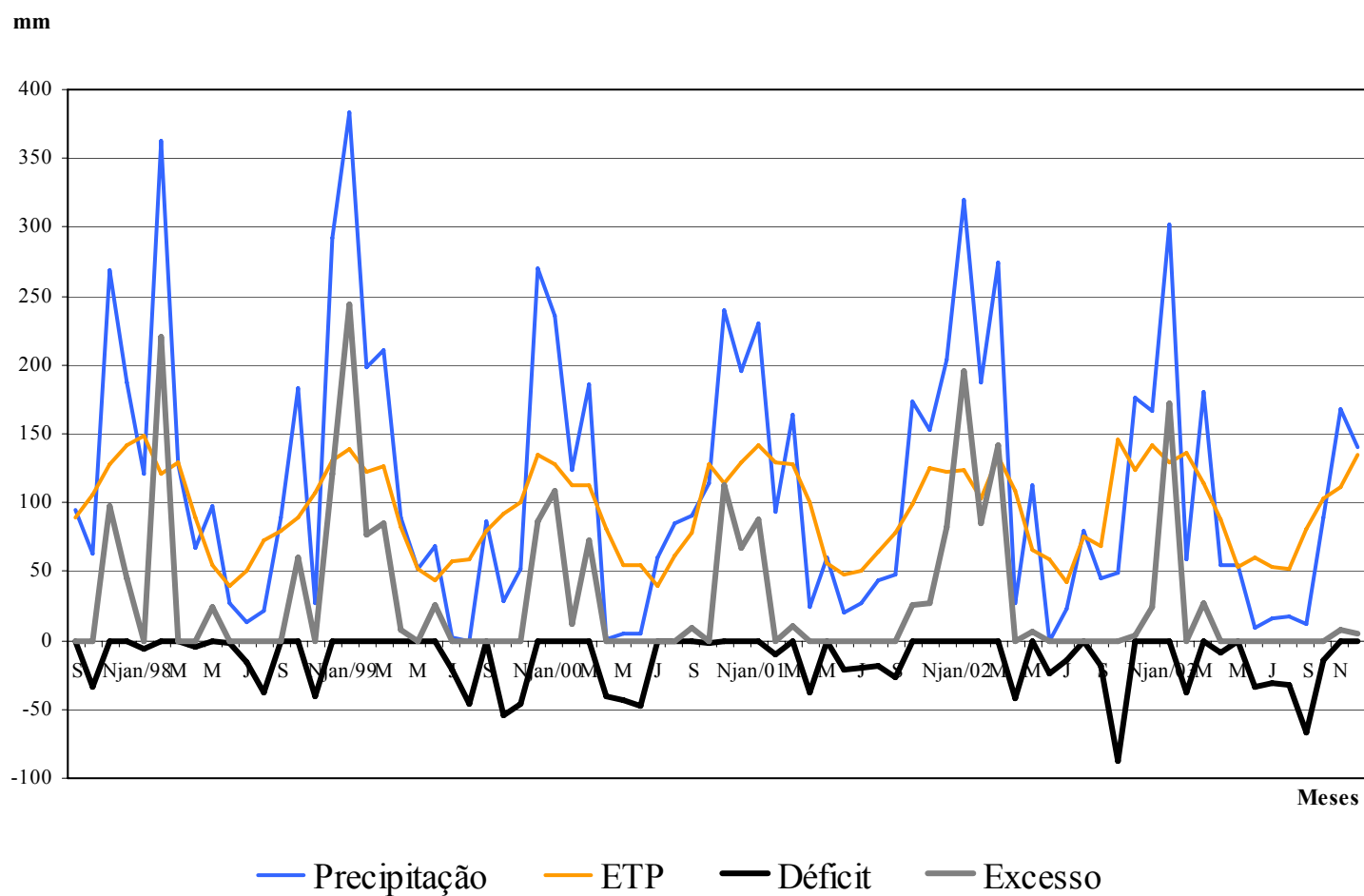


Anexo F - Temperaturas mínimas para o período de 1997 a 2003 da região de Piracicaba – SP



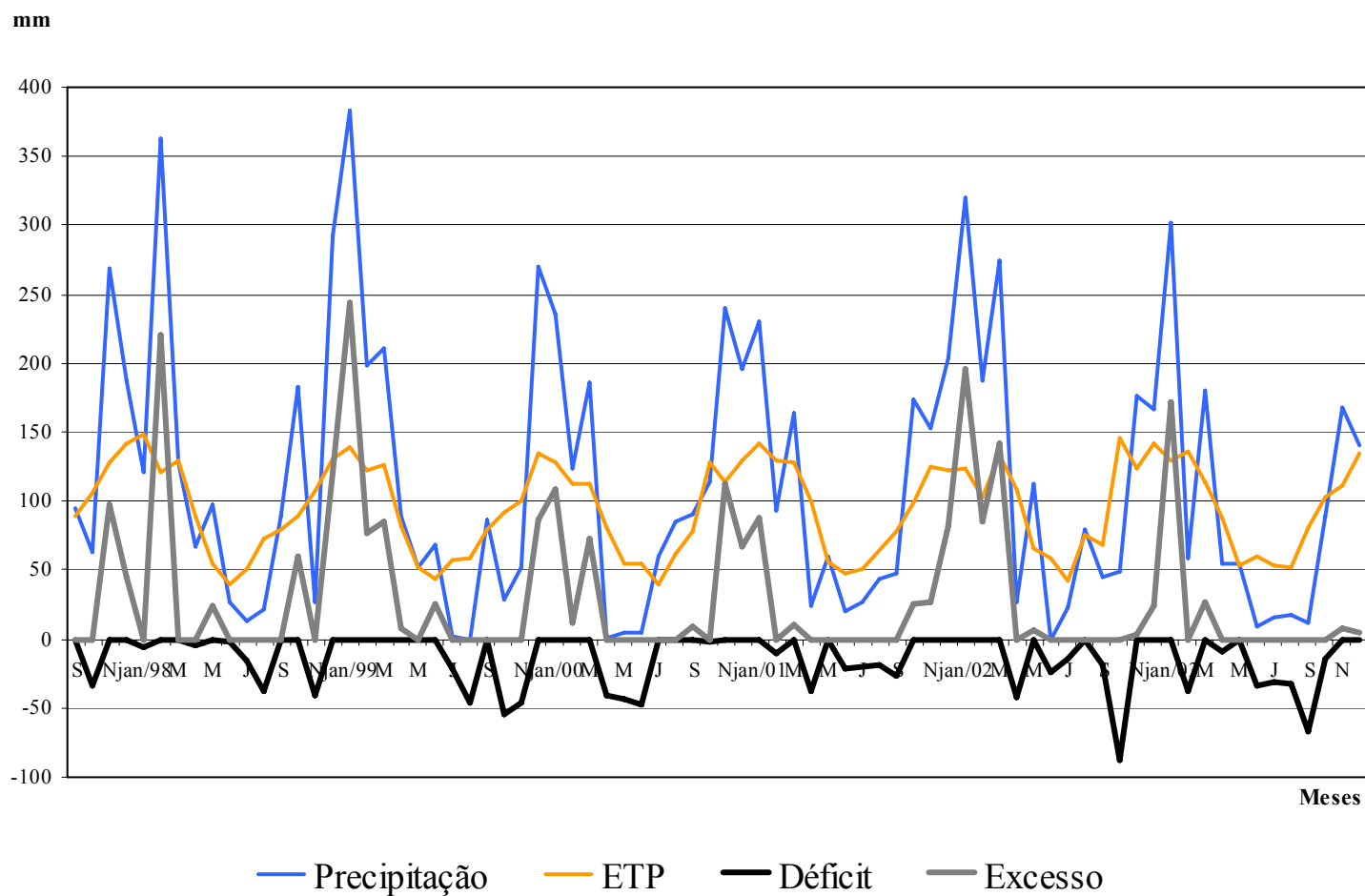
Anexo G - Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) do período de 1997 a 2003 da região de Piracicaba - SP

Balanço Hídrico 1997/2003



Anexo G - Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) do período de 1997 a 2003 da região de Piracicaba - SP

Balanço Hídrico 1997/2003



Anexo H - Área (ha) e a distância média (km), colmos (t.ha⁻¹), o ATR (kg.t⁻¹) e o rendimento médio de álcool hidratado residual (l.t⁻¹)

SETORES	ÁREA (ha)	DISTÂNCIA MÉDIA (km)	MESES DE SAFRA																							
			MAIO			JUNHO		JULHO		AGOSTO		SETEMBRO		OUTUBRO		NOVEMBRO		DEZEMBRO								
			Colmos (t.ha ⁻¹)	ATR (kg.t ⁻¹)	Álcool (l.t ⁻¹)																					
1	682	2,2	75		11,2	80	11,2	90	136	11,4	110	140	11,4	120	140	11,6	130	138	11,4	130	132	11,2	130	122	11,1	
2	695	2,6	75		11,2	80	11,2	90		11,4	110	152	11,4	120	154	11,6	130	152	11,4	130	149	11,2	130	143	11,1	
3	713	2,7	75		11,2	80	11,2	90	136	11,4	110	140	11,4	120	140	11,6	130	138	11,4	130	132	11,2	130	122	11,1	
4	682	3,5	68	136	11,2	74	136	11,2	80	136	11,4	102	11,4	110		11,6	120		11,4	120		11,2	120		11,1	
5	673	3,9	68		11,2	74	11,2	80	136	11,4	102	140	11,4	110	140	11,6	120	138	11,4	120	132	11,2	120	122	11,1	
6	704	4,2	65		11,2	70	11,2	75		11,4	83	151	11,4	100	154	11,6	104	157	11,4	104	158	11,2	104	159	11,1	
7	684	4,4	65	122	11,2	70	136	11,2	75	145	11,4	83	150	11,4	100	151	11,6	104	148	11,4	104		11,2	104		11,1
8	675	5,3	65		11,2	70	140	11,2	75	147	11,4	83	151	11,4	100	153	11,6	104	153	11,4	104		11,2	104		11,1
9	675	5,8	65		11,2	70	11,2	75		11,4	83	151	11,4	100	154	11,6	104	157	11,4	104	158	11,2	104	159	11,1	
10	696	6,3	60		11,2	65	135	11,2	70	142	11,4	78	147	11,4	88	150	11,6	90	151	11,4	90		11,2	90		11,1
11	697	7,2	60		11,2	65	136	11,2	70	145	11,4	78	150	11,4	88	151	11,6	90	148	11,4	90		11,2	90		11,1
12	597	7,9	55		11,2	60	11,2	65		11,4	70	152	11,4	75	154	11,6	80	152	11,4	80	149	11,2	80	143	11,1	
13	698	8,6	55		11,2	60	11,2	65		11,4	70	152	11,4	75	154	11,6	80	152	11,4	80	149	11,2	80	143	11,1	
14	599	9,4	55	136	11,2	60	136	11,2	65	136	11,4	70		11,4	75		11,6	80		11,4	80		11,2	80		11,1
15	504	10,5	75		11,2	80	11,2	90	136	11,4	110	140	11,4	120	140	11,6	130	138	11,4	130	132	11,2	130	122	11,1	
16	591	11,3	75		11,2	80	11,2	90		11,4	110	152	11,4	120	154	11,6	130	152	11,4	130	149	11,2	130	143	11,1	
17	522	12,6	68		11,2	74	11,2	80	136	11,4	102	140	11,4	110	140	11,6	120	138	11,4	120	132	11,2	120	122	11,1	
18	645	13,3	68	136	11,2	74	136	11,2	80	136	11,4	102		11,4	110		11,6	120		11,4	120		11,2	120		11,1
19	673	13,8	65		11,2	70	11,2	75	136	11,4	83	140	11,4	100	140	11,6	104	138	11,4	104	132	11,2	104	122	11,1	
20	674	14,5	65		11,2	70	11,2	75		11,4	83	151	11,4	100	154	11,6	104	157	11,4	104	158	11,2	104	159	11,1	
21	675	15,2	60	122	11,2	65	136	11,2	70	145	11,4	78	150	11,4	88	151	11,6	90	148	11,4	90		11,2	90		11,1
22	676	16,5	60		11,2	65	140	11,2	70	147	11,4	78	151	11,4	88	153	11,6	90	153	11,4	90		11,2	90		11,1
23	688	18,4	55		11,2	60	11,2	65		11,4	70	151	11,4	75	154	11,6	80	157	11,4	80	158	11,2	80	159	11,1	
24	689	19,4	55		11,2	60	135	11,2	65	142	11,4	70	147	11,4	75	150	11,6	80	151	11,4	80		11,2	80		11,1
25	700	20,6	75		11,2	80	11,2	90	146	11,4	110	148	11,4	120	150	11,6	130	151	11,4	130	151	11,2	130	150	11,1	
26	691	21,7	68		11,2	74	11,2	80		11,4	102	152	11,4	110	154	11,6	120	152	11,4	120	149	11,2	120	143	11,1	
27	682	22,5	68		11,2	74	11,2	80		11,4	102	152	11,4	110	154	11,6	120	152	11,4	120	149	11,2	120	143	11,1	
28	693	23,9	65	136	11,2	70	136	11,2	75	136	11,4	83		11,4	100		11,6	104		11,4	104		11,2	104		11,1
29	675	25	65		11,2	70	11,2	75		11,4	83	151	11,4	100	154	11,6	104	157	11,4	104	158	11,2	104	159	11,1	
30	687	27,1	60	122	11,2	65	136	11,2	70	145	11,4	78	150	11,4	88	151	11,6	90	148	11,4	90		11,2	90		11,1

Anexo I - Capacidade mensal de corte dos setores homogêneos (t) em função do tipo de corte, o custo mensal do corte de cada setor homogêneo (R\$.t⁻¹), a capacidade de transporte (t) de acordo com o tipo de caminhão (Treminhão ou Rodotrem) e o custo do transporte de cada setor (R\$.t⁻¹) em função do caminhão e da distância (continua)

SETOR.CORTE	MAIO		JUNHO		JULHO		AGOSTO		SETEMBRO		OUTUBRO		NOVEMBRO		DEZEMBRO	
	Capac. Corte (t)	Custo Corte (R\$.t ⁻¹)														
1.Manual	45000	4,46	45000	4,48	45000	4,55	45000	4,52	45000	4,66	45000	4,53	45000	4,42	45000	4,43
2.Manual	30000	4,57	30000	4,54	30000	4,59	30000	4,62	30000	4,68	30000	4,59	30000	4,46	30000	4,48
3.Manual	30000	4,49	30000	4,51	30000	4,53	30000	4,55	30000	4,69	30000	4,54	30000	4,44	30000	4,46
4.Manual	45000	4,54	45000	4,54	45000	4,56	45000	4,56	45000	4,7	45000	4,55	45000	4,52	45000	4,49
5.Manual	42000	4,51	42000	4,51	42000	4,57	42000	4,58	42000	4,7	42000	4,56	42000	4,52	42000	4,49
6.Mecânico	53000	2,55	53000	2,53	53000	2,59	53000	2,62	53000	2,71	53000	2,57	53000	2,53	53000	2,5
7.Manual	51000	4,53	51000	4,54	51000	4,6	51000	4,63	51000	4,72	51000	4,58	51000	4,54	51000	4,51
8.Mecânico	51000	2,57	51000	2,55	51000	2,61	51000	2,64	51000	2,73	51000	2,59	51000	2,55	51000	2,52
9.Manual	30000	4,53	30000	4,57	30000	4,62	30000	4,65	30000	4,74	30000	4,6	30000	4,56	30000	4,53
10.Mecânico	32000	2,58	32000	2,58	32000	2,63	32000	2,66	32000	2,75	32000	2,61	32000	2,57	32000	2,54
11.Manual	26000	4,48	26000	4,48	26000	4,55	26000	4,52	26000	4,66	26000	4,53	26000	4,42	26000	4,43
12.Manual	35000	4,54	35000	4,54	35000	4,59	35000	4,62	35000	4,68	35000	4,59	35000	4,46	35000	4,48
13.Manual	25000	4,54	25000	4,51	25000	4,53	25000	4,55	25000	4,69	25000	4,54	25000	4,44	25000	4,46
14.Mecânico	18000	2,55	18000	2,54	18000	2,56	18000	2,56	18000	2,7	18000	2,55	18000	2,52	18000	2,49
15.Mecânico	22000	2,51	22000	2,51	22000	2,57	22000	2,58	22000	2,7	22000	2,56	22000	2,52	22000	2,49
16.Manual	29000	4,53	29000	4,53	29000	4,59	29000	4,62	29000	4,71	29000	4,57	29000	4,53	29000	4,5
17.Manual	27000	4,54	27000	4,54	27000	4,6	27000	4,63	27000	4,72	27000	4,58	27000	4,54	27000	4,51
18.Manual	40000	4,53	40000	4,55	40000	4,61	40000	4,64	40000	4,73	40000	4,59	40000	4,55	40000	4,52
19.Mecânico	22000	2,53	22000	2,57	22000	2,62	22000	2,65	22000	2,74	22000	2,6	22000	2,56	22000	2,53
20.Manual	35000	4,56	35000	4,58	35000	4,63	35000	4,66	35000	4,75	35000	4,61	35000	4,57	35000	4,54
21.Manual	25000	4,44	25000	4,48	25000	4,55	25000	4,52	25000	4,66	25000	4,53	25000	4,42	25000	4,43
22.Manual	21000	4,53	21000	4,54	21000	4,59	21000	4,62	21000	4,55	21000	4,59	21000	4,46	21000	4,48
23.Manual	21000	4,49	21000	4,51	21000	4,53	21000	4,55	21000	4,69	21000	4,54	21000	4,44	21000	4,46
24.Mecânico	20000	2,52	20000	2,54	20000	2,56	20000	2,56	20000	2,7	20000	2,55	20000	2,52	20000	2,49
25.Mecânico	23000	2,5	23000	2,51	23000	2,57	23000	2,58	23000	2,7	23000	2,56	23000	2,52	23000	2,49
26.Manual	22000	4,51	22000	4,53	22000	4,59	22000	4,62	22000	4,71	22000	4,57	22000	4,53	22000	4,5
27.Manual	22000	4,53	22000	4,54	22000	4,6	22000	4,63	22000	4,72	22000	4,58	22000	4,54	22000	4,51
28.Manual	38000	4,57	38000	4,55	38000	4,61	38000	4,64	38000	4,73	38000	4,59	38000	4,55	38000	4,52

Anexo I - Capacidade mensal de corte dos setores homogêneos (t) em função do tipo de corte, o custo mensal do corte de cada setor homogêneo (R\$.t⁻¹), a capacidade de transporte (t) de acordo com o tipo de caminhão (Treminhão ou Rodotrem) e o custo do transporte de cada setor (R\$.t⁻¹) em função do caminhão e da distância (continuação)

SETOR.CORTE	MAIO		JUNHO		JULHO		AGOSTO		SETEMBRO		OUTUBRO		NOVEMBRO		DEZEMBRO	
	Capac. Corte (t)	Custo Corte (R\$.t ⁻¹)														
29.Manual	25000	4,53	25000	4,57	25000	4,62	25000	4,65	25000	4,74	25000	4,6	25000	4,56	25000	4,53
30.Mecânico	22000	2,55	22000	2,58	22000	2,63	22000	2,66	22000	2,75	22000	2,61	22000	2,57	22000	2,54

SETOR.TRANSPORTE	Capacidade									Custo Transp. (R\$.t ⁻¹)
	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	Transp. (t)	
1.Treminhão	20055	21059	23066	27081	29088	31095	27081	27081	27081	1,7
1.Rodotrem	22055	23059	25066	29081	31088	33095	29081	29081	29081	1,5
2.Treminhão	20640	21683	23768	27939	30024	32109	27939	27939	27939	1,7
2.Rodotrem	22640	23683	25768	29939	32024	34109	29939	29939	29939	1,5
3.Treminhão	20343	21365	23411	27502	29548	31594	27502	27502	27502	1,8
3.Rodotrem	22343	23365	25411	29502	31548	33594	29502	29502	29502	1,6
4.Treminhão	18883	20108	21333	25825	27458	29500	23783	23783	23783	1,8
4.Rodotrem	20883	22108	23333	27825	29458	31500	25783	25783	25783	1,6
5.Treminhão	19142	20390	21637	26213	27876	29956	24133	24133	24133	1,9
5.Rodotrem	21142	22390	23637	28213	29876	31956	26133	26133	26133	1,7
6.Treminhão	18091	19098	20105	21716	25140	25946	21918	21918	21918	1,9
6.Rodotrem	20091	21098	22105	23716	27140	27946	23918	23918	23918	1,7
7.Treminhão	17662	18636	19610	21168	24480	25259	21363	21363	21363	2
7.Rodotrem	19662	20636	21610	23168	26480	27259	23363	23363	23363	1,8
8.Treminhão	17465	18424	19383	20917	24177	24944	21108	21108	21108	2
8.Rodotrem	19465	20424	21383	22917	26177	26944	23108	23108	23108	1,8
9.Treminhão	17476	18435	19395	20930	24193	24961	21122	21122	21122	2
9.Rodotrem	19476	20435	21395	22930	26193	26961	23122	23122	23122	1,8
10.Treminhão	16926	17920	18914	20504	22491	22889	20504	20504	20504	2,1
10.Rodotrem	18926	19920	20914	22504	24491	24889	22504	22504	22504	1,9
11.Treminhão	17344	18373	19401	21047	23105	23516	21047	21047	21047	2,1
11.Rodotrem	19344	20373	21401	23047	25105	25516	23047	23047	23047	1,9

Anexo I - Capacidade mensal de corte dos setores homogêneos (t) em função do tipo de corte, o custo mensal do corte de cada setor homogêneo (R\$.t⁻¹), a capacidade de transporte (t) de acordo com o tipo de caminhão (Treminhão ou Rodotrem) e o custo do transporte de cada setor (R\$.t⁻¹) em função do caminhão e da distância (continuação)

SETOR.TRANSPORTE	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	Custo
	Capacidade Transp. (t)								Transp. (R\$.t-1)
12.Treminhão	14128	14958	15788	16618	17448	18277	16618	16618	2,2
12.Rodotrem	16128	16958	17788	18618	19448	20277	18618	18618	2
13.Treminhão	15974	16972	17970	18967	19965	20963	18967	18967	2,2
13.Rodotrem	17974	18972	19970	20967	21965	22963	20967	20967	2
14.Treminhão	14156	14988	15820	16653	17485	18317	16653	16653	2,2
14.Rodotrem	16156	16988	17820	18653	19485	20317	18653	18653	2
15.Treminhão	15113	15787	17135	19832	21180	22528	19832	19832	2,3
15.Rodotrem	17113	17787	19135	21832	23180	24528	21832	21832	2,1
16.Treminhão	19783	20768	22739	26681	28652	30623	26681	26681	2,3
16.Rodotrem	21783	22768	24739	28681	30652	32623	28681	28681	2,1
17.Treminhão	14579	15424	16269	19368	20495	21904	17960	17960	2,3
17.Rodotrem	16579	17424	18269	21368	22495	23904	19960	19960	2,1
18.Treminhão	18448	19635	20821	25172	26754	28732	23195	23195	2,4
18.Rodotrem	20448	21635	22821	27172	28754	30732	25195	25195	2,2
19.Treminhão	17432	18389	19345	20875	24127	24892	21066	21066	2,4
19.Rodotrem	19432	20389	21345	22875	26127	26892	23066	23066	2,2
20.Treminhão	17448	18405	19363	20895	24150	24916	21086	21086	2,4
20.Rodotrem	19448	20405	21363	22895	26150	26916	23086	23086	2,2
21.Treminhão	18304	19413	20521	22295	24513	24956	22295	22295	2,5
21.Rodotrem	20304	21413	22521	24295	26513	26956	24295	24295	2,3
22.Treminhão	16530	17491	18452	19989	21911	22295	19989	19989	2,5
22.Rodotrem	18530	19491	20452	21989	23911	24295	21989	21989	2,3
23.Treminhão	15787	16768	17749	18729	19710	20691	18729	18729	2,6
23.Rodotrem	17787	18768	19749	20729	21710	22691	20729	20729	2,4
24.Treminhão	15806	16788	17770	18753	19735	20717	18753	18753	2,6
24.Rodotrem	17806	18788	19770	20753	21735	22717	20753	20753	2,4
25.Treminhão	20015	21016	23018	27022	29024	31026	27022	27022	2,8
25.Rodotrem	22015	23016	25018	29022	31024	33026	29022	29022	2,6

Anexo I - Capacidade mensal de corte dos setores homogêneos (t) em função do tipo de corte, o custo mensal do corte de cada setor homogêneo (R\$.t⁻¹), a capacidade de transporte (t) de acordo com o tipo de caminhão (Treminhão ou Rodotrem) e o custo do transporte de cada setor (R\$.t⁻¹) em função do caminhão e da distância (conclusão)

SETOR.TRANSPORTE	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	Custo Transp. (R\$.t-1)
	Capacidade Transp. (t)								
26.Treminhão	18412	19595	20779	25118	26696	28668	23145	23145	2,8
26.Rodotrem	20412	21595	22779	27118	28696	30668	25145	25145	2,6
27.Treminhão	18657	19862	21067	25485	27092	29100	23477	23477	2,9
27.Rodotrem	20657	21862	23067	27485	29092	31100	25477	25477	2,7
28.Treminhão	17868	18858	19848	21431	24797	25589	21629	21629	2,9
28.Rodotrem	19868	20858	21848	23431	26797	27589	23629	23629	2,7
29.Treminhão	17458	18417	19375	20908	24167	24933	21100	21100	3
29.Rodotrem	19458	20417	21375	22908	26167	26933	23100	23100	2,8
30.Treminhão	17142	18154	19166	20785	22808	23213	20785	20785	3
30.Rodotrem	19142	20154	21166	22785	24808	25213	22785	22785	2,8

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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