

PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA APLICADA À COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR COM ÊNFASE NA RECUPERAÇÃO MÁXIMA DE AÇÚCAR¹

Márcio Caliari², Manoel Soares Soares Júnior² e Gil Eduardo Serra³

ABSTRACT

MATHEMATICAL APPROACH APPLIED TO SUGARCANE HARVESTING WITH EMPHASIS ON MAXIMIZATION OF SUGAR RECOVERY

Using a mathematical program, a simulation of sugarcane harvesting was carried out in a Brazilian sugarmill in the 1998/1999 growing season. Results showed the possibility feasibility to obtain a 6.5% gain on sugar recovery per area in comparison with traditional planning, consisting on personal judgement of factors as sugarcane age, sugar content, variety maturation curve and others. The overall field planning also allows for personal intervinience for promoting necessary adaptations and simulations in the growing areas, as well as other sugarcane field management problems. The variable which is maximized is the sugar production per harvested area, that is, the interaction of sugarcane productivity ($t.ha^{-1}$) and sugar content (Pol% Cane), throughout the harvesting season. The fields were preferentially selected for harvesting according more to the sugarcane growing potential than sugar content.

KEY WORDS: mathematical program, sugarmill, sucrose optimization.

RESUMO

Uma simulação da colheita de cana-de-açúcar, com a ajuda de programação matemática, foi realizada em uma usina de açúcar brasileira, na safra de 1998/1999. Os resultados mostraram a possibilidade de obtenção de 6,5% de ganho no açúcar recuperado do campo, em comparação ao planejamento tradicional, que consiste de um julgamento pessoal de fatores como idade da cana, teor de açúcar, curva de maturação da variedade e outros. O planejamento do corte dos talhões também permite a intervenção pessoal para promover adaptações necessárias e simulações para definição de reforma de talhões, áreas de plantio e outros problemas de manejo da lavoura de cana-de-açúcar. A variável maximizada é a produção de açúcar por área colhida, ou seja, a interação da produtividade de cana-de-açúcar ($t.ha^{-1}$) e teor de açúcar (Pol% Cane), no decorrer de toda a colheita. Os talhões foram selecionados para corte muito mais de acordo com o potencial de crescimento da cana-de-açúcar do que pelo teor de açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: programação matemática, usina de açúcar, otimização de sacarose.

INTRODUÇÃO

A agroindústria sucroalcooleira, em busca do aumento da produtividade agro-industrial e diminuição de custos, tem investido em pesquisa e desenvolvimento. Entre as áreas de maior desenvolvimento, estão as de melhoramento genético da cana-de-açúcar, de transporte, e de tecnologia industrial, com ênfase na recuperação do açúcar contido na cana.

A maior recuperação do açúcar contido na cana-de-açúcar é assunto bastante pesquisado pelos técnicos ligados ao setor de produção de álcool e

açúcar. O aumento da recuperação de açúcar se deve, principalmente, à evolução tecnológica dos equipamentos fabricados e às melhorias feitas nos processos clássicos de preparo da cana, de extração e clarificação de caldo, e de fabricação de álcool e açúcar. Atualmente, aumentos globais na eficiência são muito pequenos, uma vez que as eficiências industriais alcançadas nas diversas etapas já são bastante expressivas.

Segundo informações apresentadas por Paes (1996), relativas à safra 1996/1997, de treze usinas do Estado de São Paulo, com doze variedades de

1. Parte da tese de doutorado do primeiro autor, apresentada à Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) / Faculdade de Engenharia de Alimentos. Trabalho recebido em fev./2004 e aceito para publicação em nov./2004 (registro nº 589).

2. Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos/UFG, C.P. 131. CEP 74001-970, Goiânia - GO. E-mail: macaliari@ig.com.br

3. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Unicamp. CP 6121, CEP 13081-970. Campinas-SP. E-mail: gilserra@globo.com

cana-de-açúcar, revelam que a porcentagem Pol%Cana colhida foi 4% a 14% inferior ao nível máximo de Pol%Cana. Considerando que nessa mesma safra o Brasil colheu 231,4 milhões de toneladas de cana, se tal produção apresentasse uma média de 14% em Pol%Cana, poder-se-ia calcular que o açúcar colocado nas indústrias seria de aproximadamente 32,4 milhões de toneladas. Assim, uma diferença de 1% neste total aumentaria a quantidade de açúcar em aproximadamente 324 mil toneladas.

As curvas de acúmulo de açúcar são dependentes da variedade. O conceito do "potencial de acúmulo" levou à chamada "regra do mínimo arrependimento", através da definição de uma programação de colheita que permita maximizar os resultados da safra como um todo. Estima-se que as possibilidades de ganho através da adequada programação de colheita sejam da ordem de 2% a 4% da margem de contribuição total da safra. Para tanto, basta respeitar as características agronômicas de cada variedade, em termos dos solos onde serão cultivadas, da sua capacidade de brotação de soqueira, e do seu potencial de acúmulo de sacarose, entre outras (Carvalho *et al.* 1990).

Baseados no fato de a produtividade da cana ser o fator mais sensível para baixar o custo da tonelada de açúcar, Alexander & Baldwin (1999) expõem que no Havaí a meta é manter ou ultrapassar a produtividade média de longo-prazo, em todo talhão de cana. Se essa meta for atingida, poderão ser produzidas cerca de 34 t.ha⁻¹ de açúcar, em média, considerando que, devido a fatores climáticos, a produtividade cresce e decresce com o tempo. Na safra de 1998, a produtividade do campo, naquele Estado, foi de cerca de 31,4 t.ha⁻¹ de açúcar. O gerenciamento é conduzido com a visão em cada talhão de cana.

A colheita de cana-de-açúcar é uma administração de sacrifícios. Não se pode colher todo contingente de matéria-prima no ponto de máxima maturação de cada variedade. A safra pode se estender por até oito meses, e os picos de riqueza da cana se concentram em apenas dois ou três meses. Essa característica da planta determinou o procedimento usual à maior parte das empresas do setor de administrar o processo de colheita sacrificando determinadas variedades em benefício de outras (Silveira Neto 1992).

Salata (1983), em estudo realizado na Açucareira Quatá-SP, com os dados da safra de 1983/1984, verificou a importância de antes do plantio ou

da organização de uma safra ter-se em mente que qualquer diferença a mais em Pol%Cana reflete em lucros fabulosos a custo zero. Segundo o autor, nada é mais importante na agroindústria canavieira do que possuir um bom programa de seleção de variedades e bons técnicos para planejamento de canaviais; pois cada variedade, se perfeitamente adaptada ao ambiente em que é explorada e ao manejo agrônômico, carrega consigo características que podem levar a produções muito próximas do seu potencial máximo. A exploração adequada das características varietais, de forma conjunta, conduz à substituição do enfoque fantasioso da variedade ideal; contudo, somente se consegue a exploração adequada mediante um planejamento eficaz.

A Copersucar (1991) desenvolveu um sistema de planejamento da colheita com restrições para: capacidade de moagem, idade mínima para corte e capacidade de transporte. A variável maximizada foi Pol%Cana mensal. O ganho estimado foi de apenas 0,01 pontos percentuais na média de Pol%Cana da safra. Nunes Junior & Shouchana (1984) consideraram a variação dos teores de sacarose e da produtividade ao longo da safra, juntamente com os custos de transporte, para determinar o valor econômico de variedades de cana, em cada mês da safra e a diferentes distâncias da indústria. Ide *et al.* (1988) utilizaram um modelo em que os talhões foram agrupados em blocos (área, solo, idade etc), e ainda com idade mínima para corte, capacidade de moagem, frentes de corte e transporte. Brugnaro *et al.* (1989) conduziram um estudo, na Usina Jatiboca, em Urucânia-MG, de maximização da produção de açúcar com o planejamento da colheita de cana. Concluíram que, como resultado da programação do corte, ocorreria um aumento global da ordem de 8% na produção.

Silveira Neto (1992) utilizou um modelo de programação de colheita na Usina Santa Adelaide, em São Paulo, representado por 303 "regiões" de cana consideradas como homogêneas. Cada "região" foi delimitada por apresentar uma mesma variedade, mesmo ciclo e idade, além de índices Pol%Cana similares. A matriz de dados foi composta por 5 mil variáveis e quatrocentas restrições. A função objetivo foi a de maximizar a produção de açúcar, a qual teve um ganho de 366 kg por hectare em relação à seqüência tradicional de corte de talhões prevista para a safra. Se considerada, por exemplo, uma produtividade de cerca de 11 t de açúcar.ha⁻¹ (80 t de cana.ha⁻¹ e 14% de Pol%Cana), o ganho foi de aproximadamente 3,3%.

Neste trabalho, o objetivo foi avaliar o ganho com o planejamento e posterior aplicação de um programa matemático, para a maximização do açúcar por área cultivada, na colheita semana a semana. Foram utilizados dados reais da Usina Cofercatu, no Estado do Paraná, com valores de produtividade e curvas de maturação projetados ao longo da safra, e capacidade de moagem e tempo de aproveitamento da safra 1998/1999.

MATERIAL E MÉTODOS

O programa de otimização da colheita de cana-de-açúcar foi desenvolvido utilizando-se um banco de dados Access, processado por meio de planilha eletrônica Excel (Microsoft Excel for Windows 1995). Os dados foram importados do banco de dados para o Excel com o auxílio da ferramenta Microsoft Query.

O pacote matemático Xa Callable Library versão 12.0, fornecido pela empresa Sunset Software Technology, foi empregado para solução da programação matemática (Xa Callable Library 1999). O modelo de programação linear matemática é o que melhor se adapta ao estudo, dada a sua grande eficiência e operacionalidade em otimização, condicionada a fatores de produção limitados.

O modelo matemático utiliza, no seu processamento, as estimativas de produtividade de cana ($t \cdot ha^{-1}$) e de Pol%Cana semanais, área dos talhões (ha) e o número de talhões de cada frente de trabalho, obtidos em consulta ao banco de dados. A partir disso, calcularam-se a quantidade de cana a ser programada para o corte, por semana e por frente de trabalho, e o número de semanas necessárias para o seu processamento.

Os dados utilizados nos testes de simulação e validação do programa foram fornecidos pelos Departamentos Agrícola e Industrial da Usina de Álcool e Açúcar Cofercatu, localizada em Florestópolis (PR). A Usina Cofercatu foi selecionada por permitir a utilização de seus dados, como também por contemplar todas as variáveis e situações encontradas na colheita de cana. Os dados corresponderam aos valores reais obtidos na safra 1998/1999.

A usina estudada é composta por uma unidade produtora, com capacidade de moagem anual de 650 mil t e diária de 4,5 mil t de cana, com o percentual do tempo de aproveitamento semanal da moenda (Ta%) apresentado na Tabela 1, que é a razão entre o tempo efetivo de trabalho e o tempo total, multiplicado por cem.

Tabela 1. Tempo de aproveitamento semanal da moenda (Ta%) na Usina Cofercatu, (Florestópolis, PR), na safra 1998/1999

semana	Ta %	semana	Ta%	semana	Ta%	semana	Ta%
1ª	44,36	10ª	82,68	19ª	53,19	28ª	95,28
2ª	37,25	11ª	83,46	20ª	25,49	29ª	66,12
3ª	89,77	12ª	67,49	21ª	33,83	30ª	51,86
4ª	87,95	13ª	28,29	22ª	49,93	31ª	81,4
5ª	75,42	14ª	68,27	23ª	86,07	32ª	37,15
6ª	84,35	15ª	94,2	24ª	51,86	33ª	38,63
7ª	96,77	16ª	59,83	25ª	95,92	34ª	3,75
8ª	80,04	17ª	47,45	26ª	30,46	-	-
9ª	87,39	18ª	67,35	27ª	94,93	-	-

O início de safra normalmente ocorre no mês de maio. No ano de 1998, a data de início foi 21 de maio e a de término, 06 de janeiro de 1999, caracterizando-se como uma safra de elevada ocorrência de chuvas, o que levou a uma grande variação no tempo de aproveitamento semanal da moenda (Tabela 1) e maior extensão do período de safra.

A cana-de-açúcar processada pela usina foi submetida à pesagem e análise de Pol%Cana, quando se determinou a quantidade de açúcar que entrou diariamente na usina. Esse resultado foi utilizado nos balanços diários e na determinação das eficiências industriais. Na Tabela 2, estão apresentados os valores de açúcar, em kg de açúcar por semana, na cana entregue semanalmente, na safra 1998/1999.

O Departamento Agrícola administrou todo o processo de seleção de talhões para colheita, além da execução das operações de queima, corte, carregamento e transporte; ou seja, a colheita da cana própria e de fornecedores foi toda gerenciada pela usina. Os talhões foram selecionados para colheita pelos agrônomos, após exame da estimativa da qualidade da cana (Brix, Pol%Cana, pureza e açúcares redutores).

A área de cana colhida na safra foi de 8.069 ha, distribuídos em 92 propriedades. Essas propriedades estavam localizadas a distâncias

Tabela 2. Produção semanal de açúcar (10^6 kg) na cana entregue na Usina Cofercatu, (Florestópolis, PR), na safra 1998/1999

semana	10^6 kg	semana	10^6 kg	semana	10^6 kg	semana	10^6 kg
1ª	1,14	10ª	3,93	19ª	2,63	28ª	5
2ª	1,87	11ª	3,81	20ª	1,17	29ª	3,47
3ª	4,3	12ª	3,37	21ª	1,79	30ª	2,67
4ª	3,5	13ª	0,85	22ª	2,48	31ª	3,97
5ª	4,42	14ª	3,43	23ª	4,03	32ª	1,75
6ª	4,27	15ª	4,88	24ª	1,82	33ª	1,65
7ª	5,12	16ª	3,14	25ª	5,65	34ª	0,08
8ª	4,07	17ª	2,33	26ª	1,35	-	-
9ª	4,65	18ª	3,52	27ª	4,93	-	-

variadas da usina e possuíam diversas variedades de cana, em diferentes estágios de crescimento. Os solos encontrados nas propriedades variavam entre baixa, média e alta produtividade.

O Departamento Agrícola dividiu a colheita em duas frentes, sendo estas denominadas como "frente longe" e "frente perto", ou ainda, "frente 1" e "frente 2", respectivamente. O percentual praticado para corte de cana entre as frentes foi de 50% para cada uma, fixo no decorrer de toda a safra. O corte de cana foi efetuado em todos os dias da semana, inclusive aos domingos, sendo totalmente manual.

Os dados de Pol% Cana e das curvas de maturação por variedade foram obtidos de levantamentos quinzenais conduzidos na usina, durante três anos, nas diversas regiões onde estão localizadas as propriedades que entregam cana. Para as variedades em que não foi possível abranger as curvas de maturação para os diversos cortes (cana planta, primeiro corte etc.) foram adotadas as curvas que melhor poderiam representar o comportamento da maturação.

Dados de produtividade agrícola (t cana talhão⁻¹) foram obtidos a partir do controle de entrada de cana na safra. Para estimativa da produtividade durante o período de safra, utilizou-se a experiência do Departamento Técnico da usina, que considerou uma variação média de 1,0 t.ha⁻¹ a cada três semanas. Essa estimativa foi compatível com a observação de Bittencourt *et al.* (1990), que afirmam que, no período de safra, a cana-planta pode ter variação mensal de até 7,0 t.ha⁻¹ e a cana-soca, de até 4,0 t.ha⁻¹.

Maturadores foram utilizados somente em talhões colhidos no início de safra, e o corte foi efetuado dentro dos prazos de carência de cada produto.

As áreas destinadas à aplicação de vinhaça em fertirrigação foram programadas de forma diferenciada, pois faz-se necessária a liberação de áreas para receber fertirrigação. Com esta restrição na programação linear, a otimização da colheita ficaria muito prejudicada. Dessa forma, para a seleção dos talhões que receberiam vinhaça, foi adotado o critério de eles não fazerem parte das restrições. Assim, ao invés de serem pré-selecionados pela equipe agrícola e não fazerem parte do programa de otimização, aqueles talhões seriam incluídos na otimização e, posteriormente, gerenciados pela equipe agrícola, que determinaria o corte segundo sua performance ou posição na otimização global. Esses talhões deveriam ser otimizados, pois representavam um grande percentual da área colhida.

A análise de correlação linear foi utilizada para o estudo da relação entre Pol% Cana, produtividade e tempo (semanas a partir do início da safra), nas frentes 1 e 2. Considerou-se intervalos semanais semelhantes (períodos com respostas similares), para explicar a influência das curvas de maturação, uso de maturadores etc.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados referem-se àqueles obtidos por simulação da colheita, segundo o modelo de otimização preconizado, visando maximizar a produção de açúcar por hectare (Pol% Cana.ha⁻¹). Nas Figuras 1 a 7 são apresentadas as médias semanais das variáveis observadas ao longo do período de safra, para as frentes de corte 1 e 2.

A Figura 1 revela que num período inicial da colheita (cerca de dois meses), ocorreu uma seleção de talhões com canas jovens; no geral, são talhões de alta produtividade, que mesmo com baixa idade média apresentaram elevada quantidade de açúcar armazenado. Para a análise correta dos dados apresentados nas Figuras 1 a 7, referentes às médias semanais das variáveis, deve ser considerado que, na frente de corte 1 a colheita nas seis primeiras semanas foi imposta pela restrição da colheita obrigatória dos talhões com aplicação de maturador químico. Na frente de corte 2, praticamente não ocorreu a colheita diferenciada pela aplicação de maturador, uma vez que apenas um talhão é que recebeu o produto. Assim, considerando a idade da maioria dos talhões colhidos, até esse período inicial a colheita seguiu selecionando para corte talhões de maior idade. As exceções a esta observação geral ocorreram em talhões com produtividade média de cana (t.ha⁻¹) reduzida (Figuras 2 e 3), o que os excluía para colheita no início da safra.

Idade relativa é a idade da cana de cada talhão, representada na data de início da safra; ou seja, a data de início da safra foi tomada como o referencial para equalização das idades dos talhões, e estabelecer uma representação comparativa. Por exemplo, uma cana colhida na 33ª semana, no final da safra tem uma idade real que é a sua idade relativa (6 meses ou 24,6 semanas acrescidas das 33 semanas ou 7,75 meses), contada a partir do início da safra, o que resulta numa idade real de 13,7 meses. A usina Cofercatu teve uma safra anterior que terminou mais cedo, e a safra em estudo teve início retardado, resultando em idades acima de 13 meses.

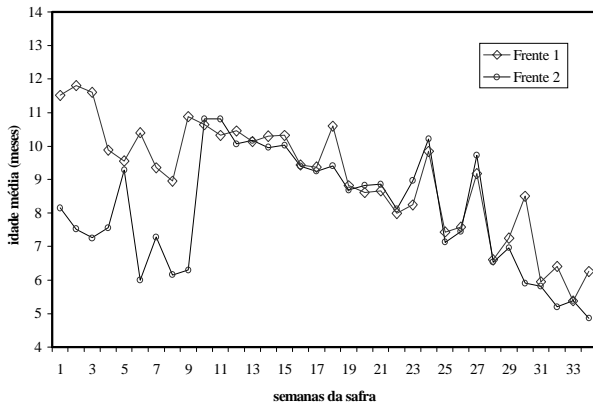


Figura 1. Idade média relativa (referente à idade no início da safra) da cana-de-açúcar programada para a colheita, em cada semana da safra, em duas frentes de corte

Quanto à produtividade ser selecionada segundo algum padrão (por exemplo, produtividades decrescentes), os resultados (Figuras 2 e 3) mostram não haver qualquer relação desse tipo. Na verdade, os talhões foram selecionados em cada semana de forma totalmente independente de sua produtividade, como já comentado.

Na frente de corte 1 (Figura 4), os talhões da primeira à sexta semanas foram selecionados para colheita em primeiro plano devido a terem recebido aplicação de maturador, embora nem todos responderam a esta aplicação. Dessa forma não foram selecionados de modo totalmente independente dentro do total de talhões. A sétima semana apresentou Pol%Cana compatível com a época de sua colheita, mas as canas da oitava e nona semanas mostraram uma média de Pol%Cana visivelmente inferior à média esperada para essa época, além de baixa produtividade relativa. Tais condições fizeram dos talhões dessas duas semanas, áreas de baixo potencial de armazenamento de açúcar.

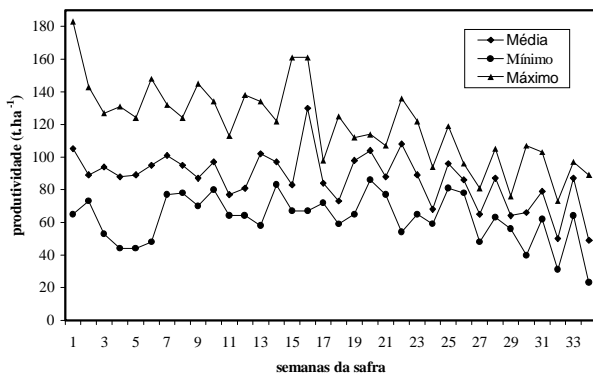


Figura 2. Produtividades média, mínima e máxima (t.ha⁻¹) da cana-de-açúcar, na colheita programada em cada semana da safra, na frente de corte 1

Nas semanas de ordem 1 a 6, priorizadas através da restrição na programação para colheita de talhões com aplicação de maturador, foi observado (relatório do banco de dados) o preenchimento da cota semanal de cana com a colheita de talhões sem maturador. Esses talhões caracterizam-se, quase que totalmente, por elevada produtividade de cana, acima de 95 t.ha⁻¹ e, ao mesmo tempo, Pol%Cana com valores elevados para o período em análise.

Pelas Figuras 4 e 5, pode ser observado que no período entre a primeira e a 12ª semana, os valores de Pol%Cana apresentaram elevada variação, atribuída à aplicação de maturador e à fase inicial de maturação da cana, quando a variabilidade é maior. A partir da 12ª semana, observa-se menor variabilidade, que diminui ainda mais a partir da 20ª semana devido ao amadurecimento mais intenso da cana, que equalizou o índice Pol%Cana.

Na frente de corte 1, no intervalo da primeira à 12ª semana, a variável Pol%Cana mostrou tendência de redução linear ($r = 0,66, p < 0,05$), e da 13ª à 34ª semana, a tendência foi de elevação ($r = 0,96, p < 0,001$). No caso estudado, a 12ª semana de safra correspondeu ao final do mês de agosto, época bastante próxima ao pico máximo de maturação das variedades, em geral. Assim, nessa época, ocorre uma certa equalização dos valores de Pol%Cana entre as diversas variedades.

A variável Pol%Cana mostrou forte tendência de elevação linear com o decorrer das semanas da safra, tanto na frente de corte 1 ($r = 0,89, p < 0,001$; semanas de 7 a 34 – sem maturador), como na frente de corte 2 ($r = 0,90, p < 0,001$; semanas de 1 a 34 – sem maturador). Essa tendência é resultado da maturação da cana-de-açúcar, com o índice Pol%Cana se elevando gradativamente no decorrer da safra, sendo um resultado natural e independente da seleção de talhões para corte.

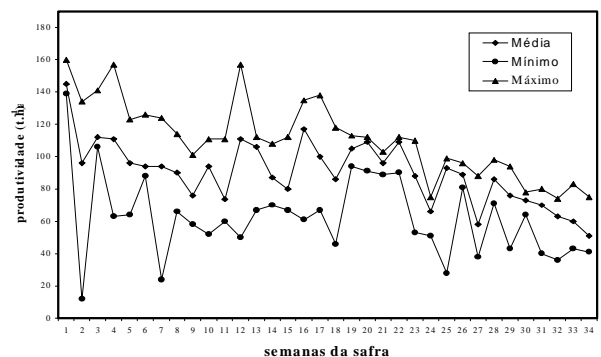


Figura 3. Produtividades média, mínima e máxima (t.ha⁻¹) da cana-de-açúcar, na colheita programada, em cada semana da safra, na frente de corte 2

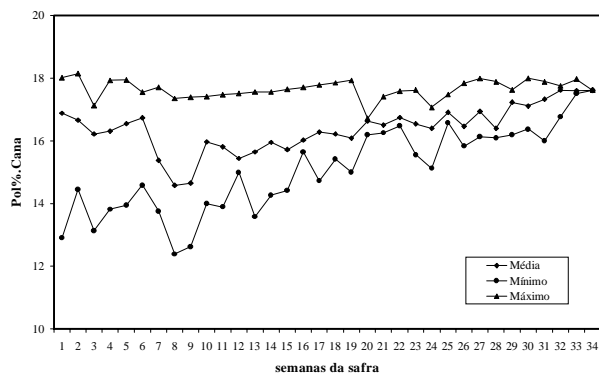


Figura 4. Índice Pol% Cana médio, mínimo e máximo da cana-de-açúcar, na colheita programada, em cada semana da safra (utilizou-se maturador nas semanas de 1 a 6), na frente de corte 1

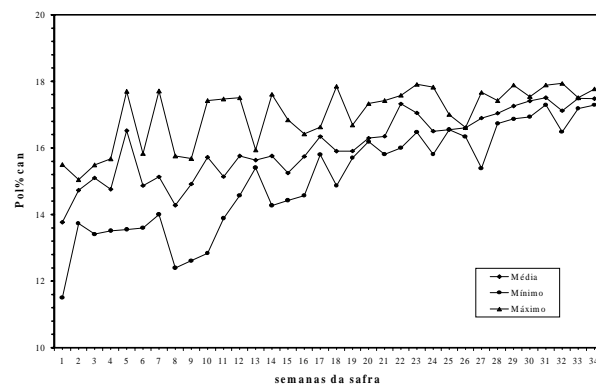


Figura 5. Índice Pol% Cana médio, mínimo e máximo da cana-de-açúcar, na colheita programada, em cada semana da safra (foi utilizado maturador na semana 5), na frente de corte 2

A produtividade de cana e o índice Pol% Cana.ha⁻¹ mostraram elevada correlação. Nas frentes de corte 1 e 2, os coeficientes de correlação (r), confrontando os dados das semanas 1 a 34, foram de 0,95 ($p < 0,001$) e 0,96 ($p < 0,001$), respectivamente. Se for considerado que Pol% Cana varia, em média, de 14,5% a 17,5%, vê-se que, sobre cada tonelada de cana, pode-se incidir um ganho médio de 3% (17,5 - 14,5) ou de 30 kg de açúcar; ao passo que o aumento de produtividade em uma tonelada de cana corresponde a um acréscimo, em média, de 145 kg a 175 kg de açúcar. Os dados dos talhões selecionados para corte, pela programação matemática, ao longo da safra, mostraram ampla variabilidade na produtividade e, como consequência, também em Pol% Cana.ha⁻¹. A partir desses dados, estimou-se que o ganho médio com a programação matemática sobre a variável Pol% Cana foi cerca de 1,0 ponto percentual absoluto, ou seja, em média, 6,25% em relação ao açúcar produzido.

Como o fator produtividade de cana predomina na produção de açúcar em campo, com menor importância de Pol% Cana, justifica-se a tendência de seleção dos talhões mais produtivos e a redução linear da produtividade ao longo das semanas de safra, uma vez que o aumento estimado na produtividade, ao longo da safra, foi adotado como idêntico para todos os talhões. O que se observou é que os talhões de alta produtividade e outros, que foram selecionados para corte no início da safra, mesmo com menor idade, apresentavam já nessa fase maturação precoce, minimizando o ganho em açúcar se colhidos posteriormente. Para a frente de corte 1 (nas semanas de 7 a 34, sem maturador) e a frente de corte 2 (semanas 1 a 34), a redução na produtividade de cana, em relação às semanas da safra, apresentou

coeficientes de correlação linear (r) iguais a: -0,52 ($p < 0,01$) e -0,65 ($p < 0,001$), respectivamente. Nas semanas de 1 a 11, foi de -0,53 (ns: $p > 0,05$) e -0,80 ($p < 0,001$), respectivamente; e nas semanas de 12 a 34, foi de -0,58 ($p < 0,01$) a -0,76 ($p < 0,01$), respectivamente. Devido à forte correlação positiva entre a produtividade de cana e de açúcar por área (t Pol% Cana.ha⁻¹), essa última variável também apresenta uma tendência de redução ao longo das semanas da safra (Figuras 6 e 7). Deve ser lembrado que, apesar da produtividade de cada talhão aumentar com o decorrer da safra, a produtividade média dos talhões selecionados para colheita apresentou uma tendência de diminuição nesse período.

A adoção, por exemplo, de aumentos diferenciados conforme a fertilidade dos solos, certamente iria produzir uma alteração na seqüência dos talhões para corte, que seriam alinhados de forma diferente. Assim, haveria a seleção para corte numa ordem com tendência a deixar os talhões com potencial de maior aumento na produtividade para colheita posterior.

A maximização de açúcar por hectare também otimiza o transporte da cana, uma vez que para todos os talhões a cana será colhida e transportada com máxima quantidade de açúcar, no âmbito de todo o canavial. A otimização do transporte, com cana colhida no seu ponto máximo da maturação, não significa obrigatoriamente a otimização na indústria.

As canas com maior produtividade principalmente no início da safra, são canas com maior crescimento, que têm maior proporção de entrenós maduros em relação aos imaturos. Desse modo, são canas com maior índice Pol% Cana e mais precoces em armazenar maiores quantidades de açúcar, não necessariamente sendo precoces no sentido fisiológico da maturação. Assim sendo, o seu potencial de

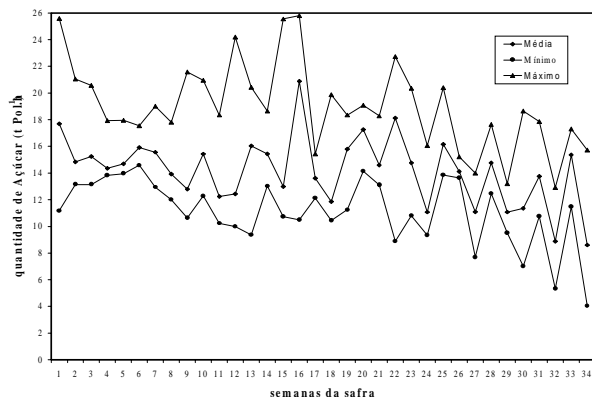


Figura 6. Quantidade de açúcar por área (t Pol% Cana.ha⁻¹), na colheita programada, em cada semana da safra, na frente de corte 1

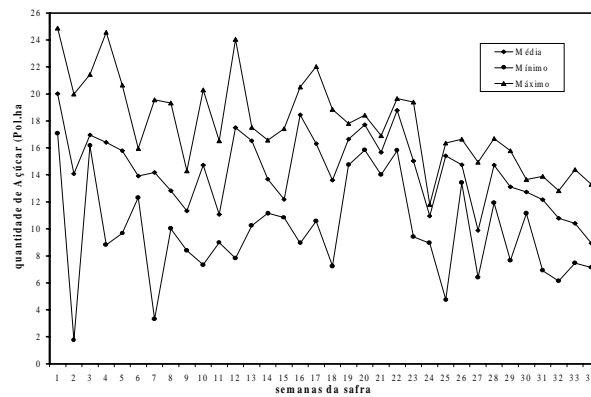


Figura 7. Quantidade de açúcar por área (t Pol% Cana.ha⁻¹), na colheita programada, em cada semana da safra, na frente de corte 2

armazenamento em relação ao máximo da maturação é menor que das canas com menor crescimento e produtividade.

A produtividade de cana (t.ha⁻¹) e de açúcar (t Pol% Cana.ha⁻¹), nas semanas avaliadas, mostraram elevada correlação ($r = 0,97$, $p < 0,001$), como é esperado, uma vez que numa semana a variabilidade em Pol% Cana é pequena. Assim, a produtividade é um fator determinante do índice Pol% Cana.ha⁻¹. Essa porcentagem, portanto, segue a tendência de redução no período da safra, que é mostrada pela produtividade de cana segundo a seqüência de talhões selecionados; na verdade, trata-se de uma tendência linear que se acentua da 20^a à 34^a semana ($r = 0,70$, $p < 0,01$).

Salata (1983) foi o primeiro a introduzir o conceito de otimização da quantidade de açúcar recuperável por hectare (TAH), mencionando que o maior ganho estaria com o valor máximo da multiplicação entre ATR (açúcar total recuperável) e TCH (tonelada de cana por hectare). Salienta que o máximo em açúcar recuperável deve ser visto comparativamente ao longo da safra, e não apenas numa determinada semana; ou seja, uma certa variedade pode não estar no seu estágio máximo de maturação, mas a multiplicação ATR*TCH pode resultar num valor máximo.

Os comentários de Salata (1983) vêm ilustrar e reforçar a idéia de que a ocorrência de uma descontinuidade no corte de cana, por qualquer motivo, deve propiciar uma reprogramação da colheita. A seqüência de corte dos talhões pode e, às vezes, deve ser alterada nesse caso. Enquanto um talhão perto do índice máximo de maturação, praticamente, não se alteraria após o período de parada, outros poderiam apresentar uma significativa elevação em Pol% Cana ou em produtividade.

CONCLUSÕES

1. O planejamento com programação matemática conduzido com a individualização dos talhões permite a visualização das diversas variáveis que caracterizam a matéria-prima, e a sua seleção para maximizar a produção de açúcar.
2. A visualização da área global abre a oportunidade para o gerenciamento e interferência direta do elemento humano para a simulação ou planejamento do canavial a longo prazo.
3. A adoção da variável quantidade maximizada de açúcar por área permite selecionar para a colheita os talhões mais próximos de seu potencial máximo de produção de açúcar, não sacrificando aqueles com maior potencial de acumulação no período restante da safra, quer pelo crescimento futuro da cana quer pela sua maturação. Pode-se, assim, abandonar a idéia da colheita de cana no ponto máximo de maturação e com idade mínima para corte e produtividade.
4. O planejamento de colheita com programação matemática, comparado à colheita não assistida matematicamente, resultou num ganho de até 6,5% sobre o total de açúcar produzido na lavoura.
5. O manuseio e o entendimento dos resultados fornecidos pela programação matemática mostram a importância do uso de "restrições". Em geral, quanto mais restrições impostas à livre solução da área global, menores os ganhos em relação ao ganho máximo teórico.
6. Para aplicação em unidades agro-industriais, recomenda-se obter dados confiáveis de produtividade e de Pol% Cana, para o período total

da safra e para cada talhão, segundo o aumento da produtividade ao longo da safra e a respectiva curva de maturação.

AGRADECIMENTOS

À Capes (Coordenadoria de Auxílio à Pesquisa e ao Ensino Superior), pela concessão de bolsa de mestrado, e ao Sr. Sérgio Bibiano Rodrigues - Diretor Secretário da Cooperativa Agropecuária dos Cafeicultores de Porecatu Ltda, por viabilizar este trabalho com a cessão de dados dos Departamentos Agrícola e Industrial da Destilaria Cofercatu.

REFERÊNCIAS

- Alexander & Baldwin Inc. 1999. Rising to the challenge. Sugar y Azucar, 94 (7): 23 - 28.
- Bittencourt, V. C., Q. A. C. Carmelo, E. G. F. Beclair, J. João & J. L. Clemente. 1990. Produtividade da cana-de-açúcar e suas relações com a fertilidade dos solos e o manejo da cultura. STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos, 8 (5/6): 10 - 14.
- Brugnaro, C., C. E. Heise, F. C. Peres & O. F. Gil. 1989. Maximização da produção de uma usina de açúcar. Usineiro, 4 (17): 39 - 45.
- Carvalho, L. C. C., G. M. Andrade Silva & A. D. S. Gonçalves. 1990. Tecnologia no manejo de variedades de cana-de-açúcar. Álcool & Açúcar, 10 (54): 24 - 28.
- Copersucar. 1991. Planejamento de Colheita. p. 323 - 335. In Seminário de Tecnologia Agrônômica, 5, Piracicaba, São Paulo. 335 p. Anais.
- Ide, B. Y., L. R. F. Alleoni, S. P. Cardoso & C. Oliveira. 1988. Planejamento de colheita da cana-de-açúcar. 305 - 314. In Seminário de Tecnologia Agrônômica, 4, Piracicaba, São Paulo. 314 p. Anais.
- Microft Excel for Windows. 1995. Release 7. Microsoft, Inc. Cary, NC, USA.
- Nunes Junior, D. & F. Shouchana. 1984. Determinação do valor econômico de variedades de cana-de-açúcar em função das épocas de corte e das distâncias da usina. Copersucar, Piracicaba, São Paulo. 25 p. (Boletim Técnico Copersucar 25).
- Paes, L. A. 1996. Análise da safra 96. p. 1 - 15. In Reunião Técnica de informações sobre as variedades SP recomendadas para Plantio. Piracicaba, Copersucar, São Paulo. 112 p. Anais.
- Salata, J. C. 1983. Variedades de Cana - Perspectivas. STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos, 2 (2): 34 - 50.
- Silveira Neto, T. 1992. Software especial para programação de colheita. Álcool & Açúcar, 12 (61): 38 - 41.
- Xa Callable Library. 1999. Version 12.0. Sunset Software Technology, San Marino, CA, USA.