

PLANEJAMENTO OTIMIZADO PARA COLHEITA DE CANA DE AÇÚCAR DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA

84966 Aneirson Silva (UNESP)
103606 Isabela Mira Ribeiro (UNESP)
103607 Paulo Lopes (UNESP)
18451 José Arnaldo Montevechi (Universidade Federal de Itajubá)
13129 Fernando Augusto Marins (UNESP)

Send a message to these authors using your personal email client:
aneirson@yahoo.com.br; isa.mribeiro@yahoo.com.br; p.lopes07@gmail.com;
montevechi@unifei.edu.br; fmarins@feg.unesp.br

Aneirson Francisco da Silva
Fernando Augusto Silva Marins
Isabela Mira Ribeiro
Paulo Roberto Lopes
José Arnaldo Barra Montevechi

RESUMO

Propõe-se um modelo de programação inteira mista para o planejamento otimizado da colheita de cana de açúcar de uma usina de açúcar e álcool (MIP-CCA). O modelo descreve o processo de gerenciamento das escolhas da condição e do tempo de poda da cana, da frente de corte e da logística agrícola, visando maximizar a razão entre os açúcares totais recuperáveis (ATR) e o grau de arrependimento (Δ). O modelo contempla a etapa agrícola, possibilitando que as decisões sejam tomadas em um horizonte de planejamento semanal. A aplicação do modelo proposto em uma usina de açúcar e álcool com dados simulados gerou resultados que foram validados por especialistas da área e que podem auxiliar na determinação de políticas ótimas de planejamento da colheita.

PALAVRAS CHAVE: Programação inteira mista, Planejamento, Colheita de cana de açúcar, açúcar e álcool.

ABSTRACT

We propose a mixed integer programming model for planning optimal harvesting sugarcane in a sugar and ethanol milling company. The model describes the process of choosing and managing the condition and length of cane pruning to maximize the ratio of the theoretical recoverable sugar (TRS) and the degree of regret (Δ). The model considers the agricultural stage, allowing decisions to be made in a weekly planning horizon. The implementation of the proposed model

in a sugar and ethanol mill using simulated data produced results that were validated by experts, and that can help to determine optimal policies for harvest planning.

KEYWORDS: Mixed integer programming, Planning, Harvest of sugarcane, Sugar and ethanol.

1. Introdução

A agroindústria brasileira da cana tem enfrentado uma grande mudança organizacional. Aspectos de gestão nesta indústria estão mudando, devido à importância de seus produtos, especialmente o etanol e eletricidade.

A Figura 1 contempla a evolução do plantio de cana de açúcar durante as safras 2009/10 e 2010/11. Percebe-se que, a região centro-sul é responsável por mais de 80% da produção nacional conforme informações da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2010). Sendo que a evolução do plantio de cana na região centro-sul, referente às safras de 2009/10 para 2010/11, foi de 11,24%, percentual superior a variação no país que foi, para o mesmo período, 10,23%.

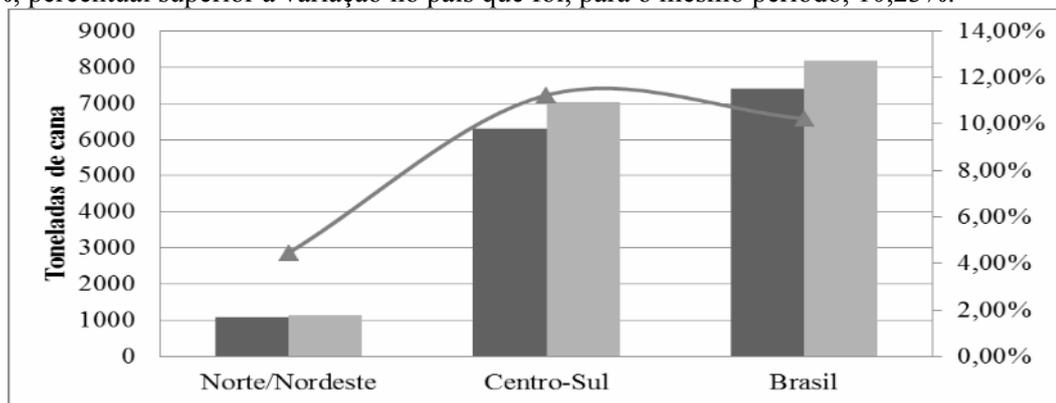


Figura 1- Evolução do plantio de cana no Brasil. Fonte: CONAB (2010).

A Figura 2 aborda a estimativa de produção de açúcar e etanol para a safra 2010/11, percebe-se que, para a safra 2010/11, há uma propensão a produzir mais etanol do que açúcar, sendo um dos motivos o aumento da frota dos carros *flex fuel* e também o aumento das exportações deste produto.

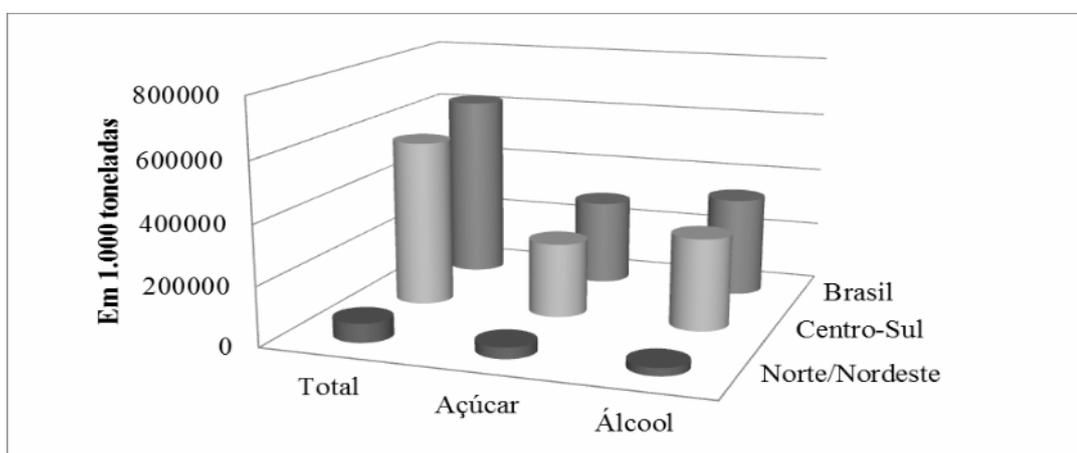


Figura 2- Produção de açúcar e etanol na safra 2010/11. Fonte: CONAB (2011).

Paiva (2009) comenta que, no Brasil, a partir da década de 90, com a abertura do mercado de açúcar e álcool, e os avanços na tecnologia e computação, possibilitou o surgimento de algumas contribuições com a utilização de métodos quantitativos na indústria sucroalcooleira. Mathew e Rajendran (1993) utilizaram a simulação a eventos discretos, com o objetivo de avaliar a programação de manutenções de uma usina, visando estabelecer intervalos razoáveis entre essas paradas.

Kawamura *et al.* (2006) utilizaram a Programação Linear Multiperíodo para auxiliar nas decisões relacionadas a transporte de produtos e armazenagens em uma cooperativa de produtores de açúcar e álcool. Paiva e Morabito (2009) desenvolveram um modelo monobjetivo que integrava as etapas agrícolas e industriais, auxiliando nas decisões de safra. Higgins *et al.* (2004), Higgins (2006), Milan *et al.* (2006), Grunow *et al.* (2007) aplicaram modelos monobjetivos em problemas sucroalcooleiros. Colin (2009) utilizou um modelo de programação quadrática para simular a aceleração da implantação de complexos sucroalcooleiros. Silva *et al.* (2010) desenvolveram um modelo multiobjetivo *fuzzy* para auxiliar nas decisões de planejamento agregado da produção com a incorporação das incertezas.

O modelo MIP-CCA proposto trata um problema monoestágio, multiproduto, multiprocesso, dinâmico, capacitado e que combina decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes (Ferreira *et al.*, 2009 ; Ziaee e Sadjadi, 2007). A pressuposição principal deste tipo de problema é que, em um período de análise só poderá ser utilizado um lote, ou seja, tem-se um modelo de produção tudo ou nada (*Small Bucket*). Logo, só ocorre custo de preparação (*setup*) quando a produção de um novo lote for iniciada (PAIVA, 2009 e PAIVA E MORABITO, 2009).

O objetivo principal desta pesquisa foi desenvolver um modelo de Programação Matemática Multiobjetivo para auxiliar nas decisões de planejamento de colheita de cana de açúcar de uma usina sucroalcooleira.

Este artigo está organizado em seções. Na seção 2 é feita uma breve descrição sobre a etapa agrícola. A seção 3 apresenta uma justificativa e material e métodos utilizados. A seção 4 refere-se ao desenvolvimento e otimização do modelo, a seção 5 contempla comentários finais e o direcionamento para novas pesquisas, seguidas das referências bibliográficas.

2. Etapa Agrícola

Essa seção descreve as principais atividades da etapa agrícola de uma usina sucroalcooleira, e também alguns trabalhos publicados pertinentes a esta etapa.

Barata (1993) utilizou a Programação Linear (PL) para desenvolver um modelo econômico aplicado às questões de corte e à reforma de canais. Costa e Moll (1999) utilizaram o Método de Análise Hierárquica (AHP) para selecionar variedades de cana para o plantio, objetivando aumentar a produtividade. Yoshizaki *et al.* (1999) aplicaram um modelo de Programação Matemática para abordar o problema da distribuição de álcool no sudeste do Brasil. Cock *et al.* (2000) desenvolveram uma metodologia para escolha de variedades de cana por meio da análise de custo total de processamento dessas variedades. Salassi *et al.* (2002) determinaram a seleção ideal do sistema de colheita de cana, por meio da aplicação de um modelo de Programação Inteira Mista. Por meio da simulação, Higgins e Davies (2005) realizaram um estudo que visava à melhoria do planejamento logístico de transporte de cana. Iannoni e Morabito (2006) investigaram um sistema de recepção de cana de açúcar de uma usina, por meio da Simulação a Eventos Discretos, para avaliar a logística de transporte. Piewthongngam *et al.* (2009) utilizaram a simulação para reduzir a quantidade de estoque de cana cortada durante o pico da safra no nordeste da Tailândia, visto que a cana cortada não deve ultrapassar mais de 48 horas para ser processada.

A etapa agrícola pode ser dividida em três macros atividades (PAIVA, 2009): (a) Formação de Canaviais; (b) Tratos Culturais e (c) Irrigação. A atividade de Corte, de Carregamento e de

Transporte (CCT) é considerada como parte da etapa agrícola, sendo subordinada à gerência agrícola.

A Formação de Canaviais é dividida em duas sub-atividades: (a.1) preparo de solo e (a.2) sulcação, adubação e plantio. Já a atividade Tratos Culturais pode ser dividida em: (b.1) tratos culturais de cana plantada (cana plantada que ainda não foi colhida) e (b.2) tratos culturais e socaria (cana proveniente de rebrotas, ou seja, cana com mais de 1 ano).

Esta diferença existe devido à cana de açúcar ser uma cultura semipermanente que propicia em média cinco safras ou cortes. Segundo Paiva (2009), a atividade (b.2) é executada em 80% do canavial, enquanto que a atividade (b.1) é executada no restante. Desta forma, além da diferença entre a idade do canavial, as operações executadas em (b.1) e (b.2) apresentam algumas variações.

No caso de (b.2), geralmente, executa-se a adubação e a fertirrigação (aplicação da vinhaça) e, se necessária, também é feita a calagem (uso de calcário para corrigir a acidez do solo) além da aplicação de herbicidas. Já a atividade (b.1) é contemplada principalmente pelo controle de ervas daninhas, visto que o solo já foi manipulado durante a sua preparação para o plantio na atividade (a.1). As Figuras 3 e 4 mostram o fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola.

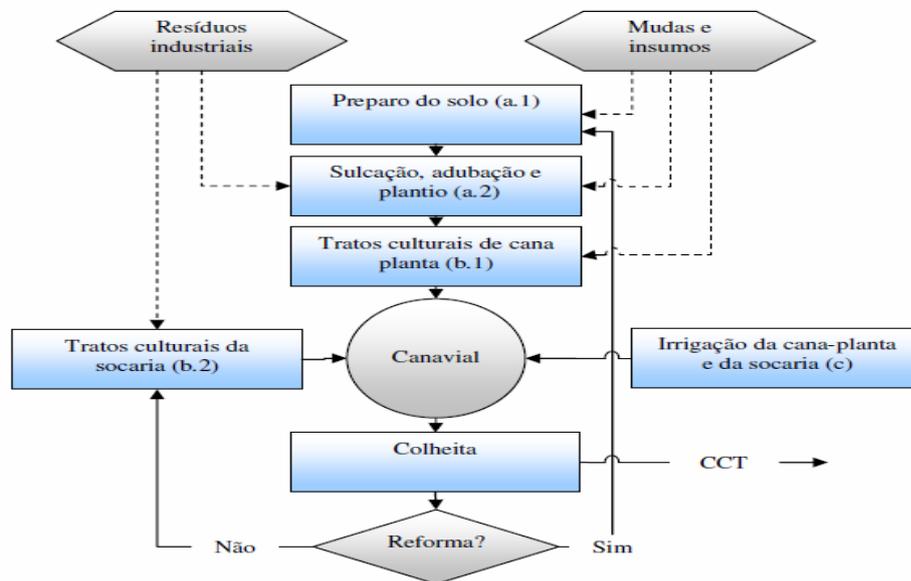


Figura 3. Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola

(Fonte: Adaptado de Fernandes, 2003; Paiva, 2009).

A etapa CCT (PAIVA, 2009) consiste de três operações principais que determinam o tipo de colheita que será adotado, conforme ilustrado na Figura 4 e descrito na seqüência.

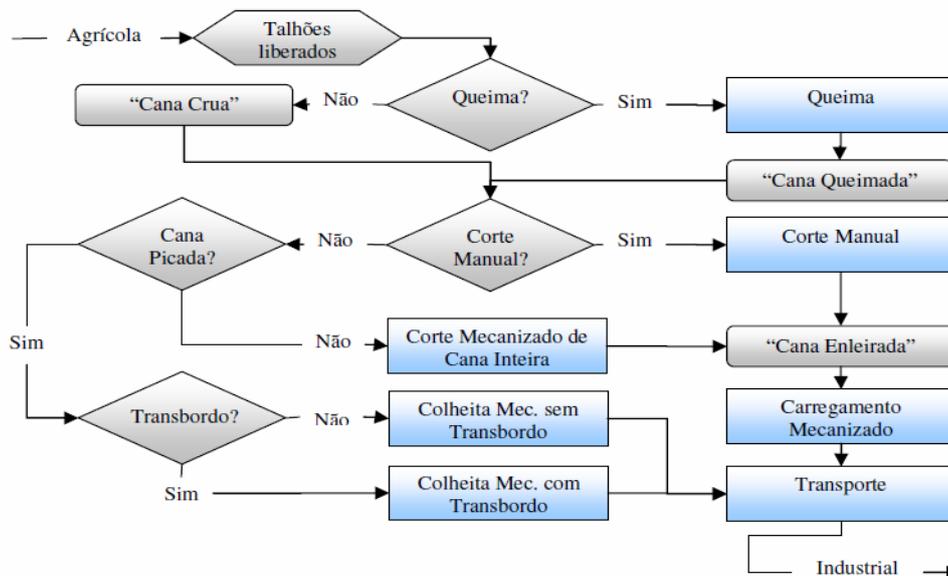


Figura 4. Fluxograma das operações que compõem a etapa CCT.

(Fonte: Adaptado de Fernandes, 2003; Paiva, 2009).

A primeira operação da CCT é o corte de cana, que pode ser manual ou mecanizado ou misto; a segunda é o carregamento de cana, que, em geral é mecanizado, mas em condições de terrenos acidentados pode ser manual e a terceira é o transporte de cana para o processamento.

Destacam-se os seguintes tipos de colheita: Corte Manual de Cana Crua com Carregamento Mecanizado (utilizado em menor escala e apenas para o plantio para áreas em que não se pode queimar a cana, ou utilizar colheita mecanizada); Corte Manual de Cana Queimada com Carregamento Mecanizado (um dos principais tipos de colheita existentes no Brasil); Corte Mecanizado de Cana Inteira com Carregamento Mecanizado (não é comum encontrá-lo nas usinas brasileiras); Corte Mecanizado de Cana Picada Sem Transbordo (não é comum encontrá-lo nas usinas brasileiras); Corte de Cana Mecanizada de Cana Picada Com Transbordo (um dos principais tipos de colheita existentes no Brasil).

Um aspecto importante na etapa agrícola é o conhecimento da Curva de Maturação que corresponde a uma representação gráfica do ciclo de vida da cana. Essa curva é comumente encontrada em função da Polaridade (POL) e do tempo até o corte, podendo ser dividida em duas fases. Uma primeira fase de crescimento vegetativo, em que a planta acumula energia na forma de sacarose, aumentando, portanto o valor do POL. Na fase seguinte a planta utiliza a energia acumulada no período anterior para a reprodução da espécie. Neste período, ocorre o decréscimo o valor do POL. A Figura 5 ilustra uma curva de maturação.

Os açúcares Totais Recuperáveis (ATR) são um dos parâmetros do sistema de pagamento de cana, e representa a quantidade de ART recuperados da cana até o xarope, ou seja, é o resultado da diferença entre o ART da cana e as perdas na lavagem da cana, bagaço final, torta dos filtros ou prensas, considerando uma eficiência média padrão.

Existe, conforme ilustrado na Figura 5, um ponto de máximo em que a fase de acúmulo de energia está completa, mas ainda não se iniciou a fase reprodutiva. Este ponto de POL máximo seria a época ideal para a colheita da cana, especialmente em termos de eficiência de rendimento da matéria prima na produção de açúcar. Embora haja uma correlação bastante significativa entre POL e Açúcares Redutores Totais (ART), para avaliação do melhor rendimento da matéria prima dos processos de produção de açúcar e álcool, seria mais aconselhável a utilização de curvas de ART. No entanto, as curvas com base no POL são as mais comumente encontradas em publicações científicas.

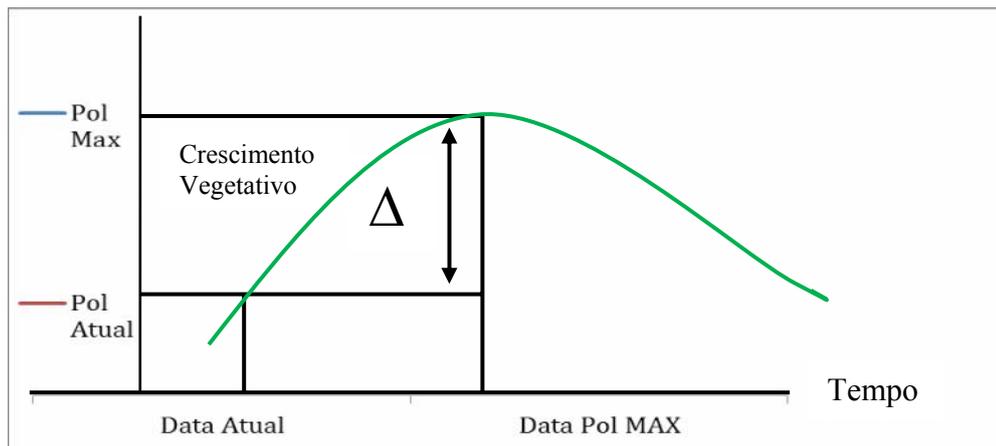


Figura 5. Ilustração de uma Curva de Maturação

Apesar da melhor época de para colheita ser a data de POL máximo, torna-se infactível realizar a colheita completa da usina nesta data, pois isto poderia gerar um zigue zagague ineficiente entre os talhões de corte favorecendo um aumento dos custos de colheita. Dessa maneira, a colheita ocorre num período próximo ao ponto de POL máximo, mas não exatamente nele, ou seja, como está representado na Figura 5, existe uma diferença (Δ) entre o POL referente à data de colheita e o máximo. É comum caracterizar Δ como sendo uma medida do arrependimento de não se colher na data de POL máximo. Portanto, o planejador de colheita visa minimizar o arrependimento Δ .

Para caracterizar em que período a cana pode ser processada, as usinas criaram o Período Útil de Industrialização (PUI), que estabelece POL % cana = 13% como satisfatório para o processamento de diferentes variedades. Desta forma, as variedades podem ser agrupadas em: Ricas ou Precoces, Médias e Pobres ou Tardias. O comportamento geral destes três grupos está ilustrado na Figura 6. Verifica-se que as variedades Ricas alcançam logo no início da safra o valor 13%, demonstrando possuir um PUI longo (mais de 150 dias), existindo exceções. As variedades Médias alcançam o valor fixado no meio da safra, apresentando PUI médio (120 – 150 dias), e as Pobres possuem PUI curto (70 – 100 dias) não apresentando grande interesse industrial.

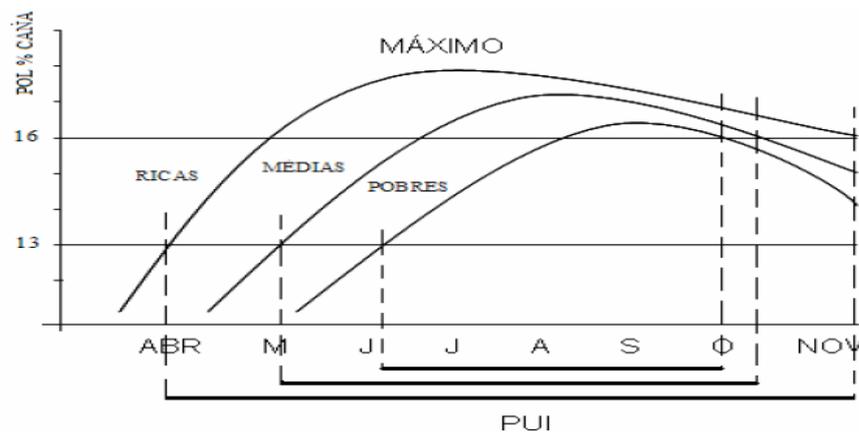
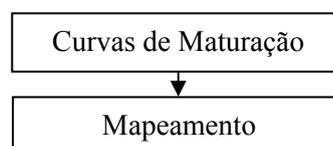


Figura 6. Modelos de maturação de cana de açúcar.

A Figura 7 mostra os passos desta pesquisa para o planejamento ótimo da colheita de cana, estes passos estão descritos a seguir.



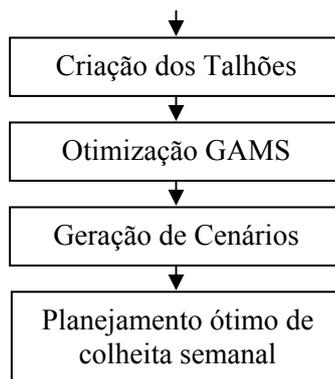


Figura 7. Etapas para o desenvolvimento de políticas ótimas para colheita de cana de açúcar, por meio da linguagem de modelagem GAMS.

Para a realização do planejamento de colheita, a usina deve escolher um especialista na área agrícola, que possua conhecimentos em relação a variedades e características da cana de açúcar e às características do solo da região trabalhada. É imprescindível que este profissional tenha contato com a área industrial para obter as informações de moagem e aproveitamento de tempo planejado para a safra.

Inicialmente deve-se proceder a Estimação das Curvas de Maturação para cada variedade; depois se faz o Mapeamento, ou seja, o cadastro básico do tipo de variedade, período de colheita, aproveitamento de tempo, irrigação, talhões, cotas e cenários; na seqüência realiza-se a Blocagem e manipulação dos talhões, onde se agrupam os talhões em blocos e estes são re-arranjados; para a Otimização do Modelo MIP-CCA, aqui proposto, adotou-se a linguagem de modelagem GAMS; no modelo desenvolvido é possível a Geração de Cenários para a eventual correção de planejamento; finalmente define-se a estratégia ótima para colheita de cana de açúcar.

3. Justificativa, Material e Métodos

Jamalnia e Soukhakian (2009) comentam que técnicas tradicionais de Programação Matemática (PM) não são adequadas para resolver problemas complexos de decisão do “mundo real”. Colin (2009) comenta que novas abordagens de PM devem ser utilizadas para resolver problemas sucroalcooleiros.

Segundo Paiva (2009), é importante que a definição do momento de colheita de cada talhão seja especificada de forma otimizada, dada a necessidade de se obter uma matéria prima com maior teor de ART e com uma pureza alta. Tal contexto justifica a importância desta pesquisa e mostra a sua contribuição científica.

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002) este trabalho pode ser classificado como sendo uma pesquisa aplicada, com objetivos empíricos descritivos, pois o modelo desenvolvido descreve as relações causais que podem existir na realidade, favorecendo a compreensão de processos reais. A forma de abordar o problema é quantitativa, sendo o método de pesquisa a modelagem e otimização, tendo sido seguidas as seguintes etapas:

- Identificação do problema – Foram realizadas visitas em algumas usinas e com apoio das pessoas envolvidas diretamente com a etapa agrícola foi possível identificar os parâmetros que deveriam compor o modelo. Também foram analisados relatórios internos de produção;
- Coleta de dados – Utilizou-se relatórios internos de produção e de informação agrícola para uma dada usina escolhida dentre aquelas visitadas;
- Modelagem – A modelagem contemplou decisões de safra (37 semanas);
- Experimento – utilizou-se a linguagem de modelagem *General Algebraic Modeling System* (GAMS 23.6) e o *solver* (CPLEX 12.2.0.1);
- Validação dos resultados – Feita com o apoio dos gestores e também com a comparação dos resultados do modelo com os resultados reais da usina escolhida.

4. Modelagem do Problema

Aqui estão os índices, parâmetros, variáveis, inequações e equações utilizadas no modelo MIP-CCA:

Índices

t	Períodos, $t \in \{1, 2, \dots, T\}$;
i	Talhões, $i \in \{b_1, b_2, \dots, b_6\}$;
f	Transporte agrícola, $f \in \{Fprop, farrend, fterc\}$;
k	Cana de fornecedores, $k \in \{forna, forn b, fornc, fornd\}$;
j	Frente de corte, $j \in \{mecanizado, manual\}$;
q	Estado da cana, $q \in \{queimada, crua\}$;
v	variedade, $v \in \{RB83, RB76, SP80, IAC86, CB45, RB72, SP71, RB73, SP70, SP79\}$;
c	Condição da cana, $c \in \{média, tardia, precoce\}$.

Parâmetros

M_t^{\min}	Moagem mínima semanal [ton/mês];
M_t^{\max}	Moagem máxima semanal [ton/mês];
CT_j	Capacidade semanal da frente j [ton/mês];
$R_{j t i}$	Custo da frente j no período t colhendo no talhão i ;
$S_{j t k}$	Custo da frente j no período t colhendo no fornecedor k ;
CP_t	Capacidade do transporte próprio no período t [ton/mês];
\square_t	Tempo aproveitado na indústria durante um período t [%];
$\beta_{f t}$	Disponibilidade da frota própria f durante o período t [%];
$Disp_{i,q,c,v,0}$	Previsão de safra para o talhão i no estado q e na condição c ;
$Disp_{k0}$	Previsão de safra por tipo de fornecedor k ;
$ATR_{i,q,c,v,t}$	Define o ATR do talhão i na condição c no período t [ton/mês];
$U_{i,q,c,v,t}$	Define a distância do ATR ótimo do talhão i na em relação ao ATR atual por fonte de matéria prima no período t [ton/mês];
$ATRK_{k t}$	Define o ATR por fonte de fornecedor k no período t [ton/mês];
$UK_{k,t}$	Define a distância do ATR ótimo do fornecedor k em relação ao ATR atual por fonte de matéria prima no período t [ton/mês];
$L_{f k t}$	Custo variável de transporte f para o fornecedor k no período t [\$/ton];
$L_{i q c t}''$	Custo de transporte do talhão i no estado q na condição c no período t ;
$C_{i,q,c,v,t}$	Custo agrícola do talhão i no estado q na condição c da variedade v no período t ;
$CK_{k t}$	Custo agrícola por fonte de fornecedor k no período t [\$/ton];
Y	Alvo do custo total da etapa agrícola, sendo este uma constante;

Variáveis de decisão

$X_{i,q,c,v,t}$	Seleção do talhão i no estado q na condição c na variedade v no período t ;
$M_{i q c v t}$	Quantidade de cana cortada no talhão i no estado q e na condição c no período t [ton];
$M_{f t}''$	Quantidade de cana transportada por opção de transporte f no período t [ton];
$Disp_{i,q,c,v,t}$	Disponibilidade de matéria prima por talhão i no estado q e na condição c no período t [ton];
$Disp_{k t}$	Disponibilidade de matéria prima por fornecedor k no período t [ton];
$H_{j t}$	Variável de escolha da opção da frente j ;

N_{kt} Variável de escolha da quantidade de cana fornecida por opção de fornecedor k no período t .

Modelo MIP-CCA

Neste modelo há 5 funções objetivo, sendo as equações (1) e (2), respectivamente, referentes a maximização do ATR da cana e a minimização do arrependimento, para as canas administradas pela usina. Já as equações (3) e (4) tem o mesmo significado, com respeito às canas não administradas pela usina, ou seja, são canas fornecidas por terceiros. Para tratar com este tipo de problemas, Deb (2001) sugere alguns métodos, como, por exemplo, o Método da Ponderação dos Objetivos, o Método de Otimização Hierárquico, o Método da Negociação, o Método do Critério Global e a Programação por Metas.

Quando se trabalha com problemas multiobjetivos duas abordagens podem ser utilizadas: a priorização e a aglutinação. Pelo fato do problema em questão apresentar funções de maximização – ver (1) e (3) - e de minimização – ver (2) e (4), adotou-se a abordagem da aglutinação visando a minimização da razão entre a segunda função com a primeira função, e da razão entre a quarta com a terceira funções, somando com a função custo global – ver equação (5), conforme mostra a equação (6).

$$\text{Max } Z_1 = \sum_i \sum_q \sum_c \sum_v \sum_t \text{ATR}_{i q c v t} M_{i q c v t} \quad (1)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_i \sum_q \sum_c \sum_v \sum_t U_{i q c v t} M_{i q c v t} \quad (2)$$

$$\text{Max } Z_3 = \sum_{k t} \text{ATR} K_{k t} N_{k t} \quad (3)$$

$$\text{Min } Z_4 = \sum_k \sum_t U K_{k t} N_{k t} \quad (4)$$

$$\text{Min } Z_5 = \sum_i \sum_q \sum_c \sum_v \sum_t M_{i q c v t} C_{i q c v t} + \sum_k \sum_t N_{k t} C K_{k t} + \sum_f \sum_k \sum_t L_{f k t} N_{k t} + \sum_i \sum_q \sum_c \sum_v \sum_t M'_{i q c v t} L''_{i q c t} + \sum_j \sum_t \sum_i R_{j t i} H_{j t} \quad (5)$$

$$\text{Min } Z_6 = \frac{\sum_i \sum_q \sum_c \sum_v \sum_t U_{i q c v t} M_{i q c v t}}{\sum_i \sum_q \sum_c \sum_v \sum_t \text{ATR}_{i q c v t} M_{i q c v t}} + \frac{\sum_k \sum_t U K_{k t} N_{k t}}{\sum_k \sum_t \text{ATR} K_{k t} N_{k t}} + \sum_i \sum_q \sum_c \sum_v \sum_t M_{i q c v t} C_{i q c v t} + \sum_k \sum_t N_{k t} C K_{k t} + \sum_f \sum_k \sum_t L_{f k t} N_{k t} + \sum_i \sum_q \sum_c \sum_v \sum_t M'_{i q c v t} L''_{i q c t} + \sum_j \sum_t \sum_i R_{j t i} H_{j t} \quad (6)$$

Restrições:

- Restrição (7) modela a disponibilidade de cana no talhão i no estado q na condição c na variedade v no período t .

$$\text{Disp}_{i q c v t} = \text{Disp}_{i q c v t-1} - M_{i q c v t-1} \quad (7)$$

- Restrição (8) modela a disponibilidade de cana no fornecedor k no período t .

$$DispK_{kt} = DispK_{kt-1} - N_{kt-1} \quad (8)$$

-Restrição (9) modela a quantidade de cana cortada do talhão i no estado q na condição c da variedade v no período t .

$$M_{iqcvt} \leq Disp_{iqcvt} \quad (9)$$

-Restrição (10) modela a quantidade de cana cortada pelo fornecedor k no período t .

$$N_{kt} \leq DispK_{kt} \quad (10)$$

-Restrição (11) modela que a quantidade de cana cortada no talhão i no estado q na condição c da variedade v no período t , mais a quantidade cortada de cana por fonte fornecimento k no período t , devem ser transportadas pelo transporte f no período t .

$$\sum_i \sum_q \sum_c \sum_v M_{iqcvt} + \sum_k N_{kt} = \sum_f M_{ft} \quad (11)$$

-Restrição (12) modela que a quantidade de cana no talhão i no estado q na condição c da variedade v no período t , mais a quantidade de cana por fonte fornecimento k no período t , devem ser cortadas pela frente j no período t .

$$\sum_i \sum_q \sum_c \sum_v M'_{iqcvt} + \sum_k N_{kt} = \sum_j H_{jt} \quad (12)$$

-Restrição (13) modela que não deve haver estoque de cana no talhão i no estado q na condição c da variedade v para a safra seguinte.

$$\sum_i \sum_q \sum_c \sum_v Disp_{iqcvt} = \sum_i \sum_q \sum_c \sum_v \sum_t M'_{iqcvt} \quad (13)$$

- Restrição (14) modela que não deve haver estoque de cana do fornecedor k para a safra seguinte.

$$\sum_k \sum_t N_{kt} = \sum_k DispK_{kt} \quad (14)$$

- Restrição (15) modela que a opção de talhão i selecionado no estado q na condição c da variedade v no período t deve ser totalmente cortada e a opção não selecionada nesse período deve ser igual à zero.

$$M_{iqcvt} = Mmax_t X_{iqcvt} \quad (15)$$

- Restrição (16-17) modela o nível de moagem no período t .

$$\sum_k N_{kt} + \sum_i \sum_q \sum_c \sum_v M_{iqcvt} \geq Mmin_t \frac{\phi_t}{100_t} \frac{\lambda_t}{100} \quad (16)$$

$$\sum_k N_{kt} + \sum_i \sum_q \sum_c \sum_v M_{iqcvt} \geq Mmax_t \frac{\phi_t}{100_t} \frac{\lambda_t}{100} \quad (17)$$

- Restrição (18) modela a capacidade do transporte próprio no período t .

$$M_{f_t}'' \leq \frac{\beta_{f_t}}{100} \cdot \frac{\lambda_t}{100} \cdot CP_t \quad (18)$$

- Restrição (19) modela que a quantidade de cana no talhão i no estado q (crua) na condição c no período t , deve ser cortada pela frente mecanizada.

$$\sum_i \sum_c \sum_v M_{i,q,c,v,t}' = H_{\text{"mecanizado"}t} \quad (19)$$

-Restrição (20) modela a capacidade da frente j no período t .

$$H_{j_t} \leq CT_{j_t} \quad (20)$$

-Restrição (21) condições de não negatividade.

$$X_{i,q,c,v,t} \in \{0,1\}; M_{i,q,c,v,t} \geq 0; M_{f_t}'' \geq 0; Disp_{i,q,c,v,t} \geq 0; DispK_{k_t} \geq 0; N_{k_t} \geq 0; H_{j_t} \geq 0 \quad (21)$$

5. Comentários gerais e direcionamento para novas pesquisas

Na Tabela 1 têm-se os resultados propostos pelo modelo para cinco semanas para dados simulados. Por motivos de restrição de espaço, neste artigo optou-se para colocar apenas os valores totais para 5 semanas, mas o modelo oferece uma série de informações gerenciais, podendo ser personalizadas para melhor aderir às necessidades dos gestores das usinas.

O modelo MIP-CCA para 5 semanas apresentou 12.735 restrições, com 1.800 variáveis binárias e 40.597 variáveis não negativas. Para otimização do modelo foi utilizado um computador com processador Intel (Core i7) 1,2 GHZ até 2,266 GHZ, com *max turbo frequency*, 4MB cache e 8GB de RAM DDR3 80MHZ e sistema operacional Windows 7 profissional 64 bits. Utilizando-se a linguagem GAMS 23.6.2 e o *solver CPLEX* 12.2.1, o tempo computacional foi de aproximadamente 30 segundos.

Os resultados consolidados estão na Tabela 1 e foram validados por especialistas, da usina de açúcar e álcool estudada, que atestaram que o modelo está aderindo bem à realidade. Desta forma, os gestores terão parâmetros sobre quais talhões cortarem semanalmente, em qual quantidade, visando obter o máximo de ATR, e a melhor aplicação dos recursos, e obtendo, assim, o custo mínimo/semana, associado ao planejamento ótimo de colheita semanal.

Tabela 1-Resultados (em [ton]) da otimização para 5 semanas do Modelo MIP-CCA.

Resultados	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
$M_{i,q,c,v,t}$	60.000	40.000	60.000	60.000	60.000
M_{f_t}'' própria			75.200	67.400	
M_{f_t}'' arrendada		90.000			67.400
M_{f_t}'' condomínio	90.000				
$Disp_{i,q,c,v,t}$	280.000	220.000	180.000	120.000	60.000
$Disp_{k_t}$	110.000	80.000	30.000	14.800	7.400

H_{jt} manual				27.400	57.400
H_{jt} mecanizado	30.000	40.000	10.000	27.4000	47.400
N_{kt}	30.000	50.000	15.200	7.400	7.400

Os resultados deste estudo têm sido promissores e incentivam outros esforços de pesquisa do grupo, tais como: (a) analisar os efeitos das incertezas nos parâmetros de entrada do modelo, por meio de técnicas de Otimização Robusta; (b), utilizar a Simulação a Eventos Discretos em conjunto com a otimização para mensurar e analisar as incertezas; (c) utilizar modelos de Programação por Metas sob certeza e sob incerteza.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES, FAPESP e FUNDUNESP pelo apoio.

Referências

- Barata, M. Q. F.**, Otimização econômica do corte e reforma de canaviais. 1992. 173 f. Dissertação (Mestrado em Economia Agrária) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.
- Bertrand, J. W. M. e Fransoo, J. C.**, Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, 22, 241-264, 2002.
- Cock, J. H.; Luna, C. A. e Palma, A.**, The trade-off between total harvestable production and concentration of the economically useful yield component: cane tonnage and sugar content. *Field Crops Research*, 67, 257-262, 2000.
- Colin, E. C.** Mathematical programming accelerates implementation of agro-industrial sugarcane complex. *European Journal of Operational Research*, 199, 232-235, 2009.
- Costa, H. G.; Moll, R. N.**, Emprego do método da análise hierárquica (AHP) na seleção de variedades para o plantio de cana-de-açúcar. *Gestão & Produção*, 3, 243-256, 1999.
- Deb, K.**, Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. John Wiley and Sons, England, 2001.
- Ferreira, D.; Morabito e R; Rangel, S.**, Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 69, 697-706, 2009.
- Grunow, M.; Günter, H. O. e Westinner, R.**, Supply optimization for the production of raw sugar. *International Journal of Production Economics*, 110, 224-239, 2007.
- Higgins, A. J. e Davies, I.**, A simulation model for capacity planning in sugar cane transport. *Computers and Electronics in Agriculture*, 47, 85-102, 2005.
- Higgins, A. J.**, Scheduling of road vehicles in sugar transport: A case study at an Australian sugar mill. *European Journal of Operational Research*, 170, 987-1000, 2006.
- Higgins, A. J.; Antony, G.; Davies, I.; Sandel, G.; Prestwidge, D. e Andrew, B. A.**, Framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. *Agricultural Systems*, 82, 99-115, 2004.
- Iannoni, A. P. e Morabito, R. A.**, Discrete simulation analysis of a logistics supply system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 42, 191-210, 2006.
- Jamalnía, A. e Soukhakian, M. A.**, A hybrid fuzzy goal programming approach with different goal priorities to aggregate production planning. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 1474-1486, 2009.

Kawamura, M. S.; Ronconi, D. P., e Yoshizaki, H., Optimizing transportation and storage of final products in the sugar and ethanol industry. *International Transactions in Operational Research*, 13, 425-439, 2006.

Mathew, J. e Rajendran, C., Scheduling of maintenance activities in a sugar industry using simulation. *Computers in Industry*, 21, 331-334, 1993.

Milan, E. L.; Fernandez, S. M. e Aragoes, L. M. P., Sugar cane transportation in Cuba, a case study. *European Journal of Operational Research*, 174, 374-386, 2006.

Paiva, R. P. O. e Morabito, R., An optimization model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. *Annals Operations Research*, 169, 117-130, 2009.

Paiva, R. P. O., Modelagem do planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético utilizando programação matemática e otimização robusta. Tese (Doutorado em Eng. de Produção) –Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

Piewthongngam, K.; Pathumnakul, S. e Setthanan, K., Application of crop growth simulation and mathematical modeling to supply chain management in the Thai sugar industry. *Agricultural System*, 102, 58-66, 2009.

Salassi, M. E.; Breaux, J. B. e Naquin, C. J., Modeling Within-season sugarcane growth for optimal harvest system selection. *Agricultural System*, 73, 261-278, 2002.

Silva, A. F; Marins, F. A. S; Salomon, V. A. P; Silva, G. e Montevechi, J. A. B., Otimização multiobjetivo fuzzy no planejamento agregado da produção e distribuição em usinas de açúcar e álcool. Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Bento Gonçalves - RS, 2010.

Ziaee, M. e Sadjadi, S.J., Mixed binary integer programming formulations for the flow shop scheduling problems. A case study: ISD projects scheduling. *Applied Mathematical Modelling*. 185, 218-228, 2007.