

UMA ABORDAGEM FUZZY DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DO BALANÇO ECONÔMICO DO APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Helenice de Oliveira FLORENTINO¹
Luiza Amália Pinto CANTÃO²
Edmundo Vergara MORENO³
Maria Márcia Pereira SARTORI⁴

- RESUMO: O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e isto tem provocado uma grande expansão desta cultura no país, principalmente na região Centro-Sul. A safra 2013/14 foi de 658,8 milhões de toneladas, com aumento de 11,9% em relação à safra 2012/13, que foi de 588,9 milhões de toneladas, significando um aumento de 69,9 milhões de toneladas maior que na safra anterior. Estes fatos têm influenciado positivamente a economia brasileira, mas por outro lado tem-se grande preocupação com as questões ambientais envolvidas nos processos do setor sucroalcooleiro. Um dos grandes problemas são as queimadas dos canaviais na pré-colheita da cana-de-açúcar, esta prática tem sido muito discutida e abolida nos tempos atuais. Mas com a redução das queimadas, o palhicho, resíduo derivado da colheita de cana-de-açúcar sem queima prévia, tornou-se foco para pesquisadores e produtores, pois a permanência deste palhicho no solo tem provocado diversos problemas de doenças e praga na rebrota, e a retirada desta biomassa é um processo muito caro por envolver diversos maquinários, pois a coleta do palhicho passa pelas etapas de enleiramento, compactação, carregamento do caminhão e transporte do campo para o centro de processamento. Assim, as vantagens no seu recolhimento, recuperação e aproveitamento têm mobilizado pesquisadores e gerentes de usinas, que estão interessados em encontrar uma maneira produtiva, econômica e eficaz para este manejo. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo para auxílio na escolha das variedades de cana-de-açúcar a serem plantadas de forma que maximize o balanço econômico do processo de transferência da biomassa residual de colheita do campo para o centro de processamento e avalie economicamente o uso desta biomassa, respeitando a demanda de açúcar da usina e as restrições sobre a área de plantio. Para isto foram utilizadas técnicas de Programação Linear Fuzzy 0-1. Os resultados desta aplicação mostraram a viabilidade de uso do modelo proposto para seleção de variedade visando o aproveitamento da biomassa residual de colheita.

¹ Universidade Estadual Paulista - UNESP, Campus de Rubião Júnior, Instituto de Biociências - IBB, Departamento de Bioestatística, CEP: 3811-6000, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: helenice@ibb.unesp.br.

² Universidade Estadual Paulista - UNESP, Campus Experimental de Sorocaba, Departamento de Engenharia Ambiental, CEP 18087-180, Sorocaba, SP, Brasil. E-mail: luiza@sorocaba.unesp.br.

³ Universidad Nacional de Trujillo, Departamento de Matemática, Trujillo, Peru. E-mail: evergara@pg.unitr.u.edu.pe

⁴ Universidade Estadual Paulista - UNESP, Campus de Botucatu, Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, FCA, CEP: 18603-970, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: mmpsartori@fca.unesp.br

- PALAVRAS-CHAVE: Modelo matemático; biomassa residual de colheita; cana-de-açúcar; programação linear fuzzy 0-1.

1 Introdução

Segundo a CONAB, 2014 (Companhia Nacional de Abastecimento) o Brasil teve um acréscimo na área plantada de cana-de-açúcar de aproximadamente 326,43 mil hectares na temporada 2013/14, equivalendo a 3,8% em relação à safra 2012/13. Segundo esta empresa, o acréscimo é reflexo do aumento de 5,1% (375,1 mil hectares) na área da Região Centro-Sul, o que compensou o decréscimo de 4,3% (48,6 mil hectares) na área da Região Norte/Nordeste. São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais foram os estados com maior acréscimo de áreas, com 132,6 mil hectares, 111,8 mil hectares, 92,5 mil hectares e 58,0 mil hectares, respectivamente. Este crescimento ocorreu, principalmente, devido à expansão de novas áreas de plantio das novas usinas em funcionamento.

Com o aumento na produção de cana, aumentaram também as dimensões dos problemas no setor sucroalcooleiro, como exemplo a poluição causada pela queima dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar. Com isto, leis foram promulgadas para diminuir e proibir esta prática e a mecanização da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia ganhou impulso. Sem queima prévia, a colheita de cana-de-açúcar, mecanizada, gera grande quantidade de resíduos na lavoura, que, se forem simplesmente abandonados no local de colheita, podem comprometer a próxima safra da cana-de-açúcar ou criar um ambiente favorável ao aparecimento de pragas.

Devido a este crescimento no setor sucroalcooleiro, nos últimos anos o processo produtivo da cana vem sofrendo grandes alterações, principalmente na forma de colheita da cana, onde os sistemas manuais e semi-mecanizados foram substituídos pelo mecanizado. Essa mudança tem ocorrido por diversos fatores, dentre eles destaca-se: a redução de custos, diminuição da oferta de mão-de-obra e principalmente devido ao protocolo agroambiental proposto pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar –UNICA, em parceria com o Governo de São Paulo. O protocolo estabelece a completa eliminação da queima da cana em 2014 nas áreas onde é possível implantar a colheita mecanizada (declividade menor que 12%) e nas áreas onde a mecanização atualmente não pode ser adotada (declividade maior que 12%), o prazo é até 2017 (UNICA, 2014).

Sem queima prévia, a colheita de cana-de-açúcar, mecanizada, gera grande quantidade de resíduos na lavoura (palhicho), que, se forem simplesmente abandonados no local de colheita, podem comprometer a próxima safra da cana-de-açúcar ou criar um ambiente favorável ao aparecimento de pragas. Por outro lado, o recolhimento do palhicho da cana-de-açúcar no campo é um processo muito caro devido ao número de maquinário utilizado. A coleta do palhicho da lavoura exige os seguintes procedimentos: primeiro este resíduo é enleirado por máquina do tipo ancinho enleirador em seguida, é enfardado por uma máquina enfardadora. Depois estes fardos são carregados por uma garra carregadora e inseridos em caminhões para serem transportados até a usina. Chegando na usina, este resíduo é desenfundado e transportado para uso nas caldeiras (Ripoli, 2004).

Assim, este trabalho propõe um modelo para auxílio na escolha das variedades de cana-de-açúcar a serem plantadas de forma que maximize o balanço econômico do processo de transferência da biomassa residual de colheita do campo para o centro de processamento, respeitando a demanda de açúcar da usina e as restrições sobre a área de

plântio. O modelo proposto correspondente a um problema de otimização multiobjetivo linear.

Em geral os problemas multiobjetivos são de difícil resolução, mas tem apresentado resultados bastante promissores quando é necessário tomar decisões visando atender diversos objetivos. Estes modelos também têm sido amplamente estudados e aplicados na resolução de problemas na área sucroalcooleira.

Em BADDADEE et al., 2008), um problema de otimização multiobjetivo é apresentado, cuja finalidade é o de auxiliar o decisor na correta utilização do bagaço da cana-de-açúcar gerado em uma usina da Tailândia, avaliando os custos e benefícios ambientais da queima do produto no local do plântio, na coleta e envio para a usina. Dois cenários são estudados visando analisar o uso do bagaço para produção de etanol e para geração de energia.

GRUNOW et al., 2007, desenvolveu um modelo de otimização baseado em hierarquias de decisão para estruturar questões operacionais e táticas envolvidos na colheita da cana-de-açúcar para a usina, conectando cada um destes níveis. Para este caso, um modelo de otimização linear inteiro misto foi aplicado.

MELE et al., 2011 usa um modelo de otimização linear inteiro misto que otimiza simultaneamente a performance econômica e ambiental da cadeia de produção.

Em PAIVA et al., 2009, o modelo abrange todos os estágios agro-industriais da moagem da cana. A função objetivo auxilia o decisor a determinar a quantidade de cana-de-açúcar moída, a seleção de fornecedores, escolha de transporte, seleção do processo industrial utilizado na produção de derivados da cana-de-açúcar (açúcar, etanol e melaço), armazenamento relacionado com o produto final, maximizando o rendimento em todo o período da colheita.

SCARPARI, 2010, otimiza, através de um problema de programação linear, a seqüência de operações da colheita visando maximizar o lucro da usina para 30 área homogêneas consideradas.

A literatura aborda um vasto número de trabalhos envolvendo otimização de processos no setor sucroalcooleiro, mas em geral tais estudos desconsideram as incertezas nos parâmetros devido a imprecisões de medidas ou outros problemas comuns que ocorrem durante a obtenção de dados. A consideração de tais incertezas ou imprecisões nos dados dos modelos pode ser alcançada com a utilização da Teoria Fuzzy, pois esta permite uma maior flexibilização da modelagem do problema de otimização. Em áreas como cadeia de produção (*supply chain*) e planejamento de distribuição, muitos problemas têm sido resolvidos usando Programação Matemática Multi-Objetivo Fuzzy, vide AMID et al., 2011; SHAW, 2012; WU et al., 2010; LIANG, 2006; IBRAHIM, 2009, entre outros.

Com o intuito de que sejam consideradas possíveis incertezas nos dados, o método de resolução do modelo de otimização multiobjetivo linear proposto neste trabalho é baseado na Teoria Fuzzy (Rommelfanger et al., 1998). Inicialmente é abordado o problema com função objetivo fuzzy (Leberling, 1981, Luhandjula, 1982) e então é aplicado o método de programação linear fuzzy 0-1 (Zimmermann et al., 1984, Herrera, 1993).

No item 2 deste trabalho é apresentado a forma de cálculo do custo e balanço econômico do aproveitamento do resíduo de colheita, no item 3 é proposto um modelo matemático para otimização do balanço econômico, no item 4 são discutidas técnicas fuzzy para resolução de problemas de programação matemática multiobjetivo 0-1, no

item 5 são apresentadas aplicações computacionais, as quais foram realizadas em um microcomputador DualCorei5-650 com 4GBde memória com 400GBde HD em linguagem C++. As conclusões são apresentadas no item 6.

2 Custos e balanço econômico

Considera-se que o processo de aproveitamento da biomassa residual de colheita inclui três tipos de custos: o custo de enleiramento (C_A), custo de compactação (C_C) e custo de transporte do resíduo do campo para o centro de processamento (C_T). Assim o custo unitário de transferência do resíduo (C), em $\text{US}\$. \text{ton}^{-1}$, é dado por:

$$C = CA + CC + CT. \quad (1)$$

Para determinar os custos C_A , C_C e C_T é necessário um estudo do uso de cada maquinário. O custo de uso da máquina enleiradora C_A é dado em dólar por tonelada de palha enleirada ($\text{US}\$. \text{ton}^{-1}$) e pode ser obtido pela equação:

$$C_A = C_f \cdot G_A,$$

onde C_f é o custo por litro de combustível em $\text{US}\$ \text{L}^{-1}$, e G_A é o consumo relativo de combustível da máquina para enleirar uma tonelada de palha, em $\text{L} \cdot \text{ton}^{-1}$.

O custo de compactação C_C é dado em dólar por tonelada $\text{US}\$ \text{ton}^{-1}$, e pode ser obtido pela equação:

$$C_C = C_f \cdot G_C,$$

em que C_f é o custo por litro de combustível em $\text{US}\$ \text{L}^{-1}$, e G_C é o consumo relativo de combustível da máquina para compactar uma tonelada de palha, em $\text{L} \cdot \text{ton}^{-1}$.

O custo de transporte (C_T) é dado em dólar por tonelada de palha que o caminhão transporta $\text{US}\$ / \text{ton}.$, e pode ser calculado por:

$$C_T = C_f \cdot G_T \cdot L, \quad (2)$$

sendo C_f o custo por litro de combustível em $\text{US}\$ \text{L}^{-1}$, G_T é o consumo relativo de combustível do caminhão para percorrer um quilômetro carregado com uma tonelada, em $\text{L} \cdot \text{ton}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ e L é a distância a ser percorrida em km.

O balanço econômico (EB), em dólares, é determinado pela diferença entre o preço que a usina paga por todo o palhiço (P) e o custo de transferência de todo resíduo do campo para a usina (C) calculado usando a equação (1), ou seja:

$$EB = P - C.$$

3 Modelo matemático

O problema é determinar dentre as n variedades adaptáveis ao local de plantio, qual a variedade i deve ser plantada em cada talhão j de área B_j hectares e distância D_j quilômetros do centro de processamento, de tal forma que ofereça o máximo valor do balanço econômico para o aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana e o

mínimo custo de transferência deste resíduo do campo para o centro de processamento, respeitando a demanda de sacarose e outras restrições impostas pela usina, $i=1:n$ e $j=1:k$.

Sabendo-se que P_i é a produtividade de palhiço da variedade i (em $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), então a quantidade de palhiço gerada pela variedade i plantada no talhão j (em tonelada) é dada por:

$$Q_{ij} = P_i \cdot B_j.$$

Um caminhão dimensionado para carregar V toneladas de palhiço, terá que percorrer uma Distância de L_{ij} quilômetros para carregar todo o palhiço da variedade i plantada no talhão j , em que L_{ij} é dado por:

$$L_{ij} = (Q_{ij}/V) \cdot D_j,$$

a razão (Q_{ij}/V) é o número de voltas que o caminhão necessita para carregar todo o palhiço da variedade i plantada no talhão j .

De (2) tem-se que o custo de transporte de uma tonelada de resíduo depende da distância a ser percorrida pelo caminhão. Assim o custo de transporte do campo para usina por tonelada de palhiço da variedade i plantada no talhão j é dado por

$$C_{Tij} = C_f \cdot G_T \cdot L_{ij}.$$

E o custo, em dólares, para retirar do campo o palhiço da variedade i plantada no talhão j é dado por:

$$TC_{ij} = (C_A + C_C + C_{Tij}) \cdot Q_{ij}.$$

Considerando que a usina paga SP dólares por tonelada de resíduo, o palhiço da variedade i plantada no talhão j vale SP_{ij} dólares, em que $SP_{ij} = SP \cdot Q_{ij}$, e o balanço econômico deste talhão, em dólares, é dado por:

$$EB_{ij} = (SP_{ij} - TC_{ij}).$$

Considerando X_{ij} a variável do problema, em que $X_{ij} = 1$ quando a variedade i é selecionada para ser plantada no talhão j e $X_{ij} = 0$ em caso contrário, o balanço econômico total do processo é dado por:

$$EB_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k EB_{ij} X_{ij}. \quad (3)$$

O custo total para retirada do palhiço do campo é dado por:

$$TC_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k TC_{ij} X_{ij}. \quad (4)$$

O modelo de otimização para o problema é proposto a seguir:

$$\text{Max } (EB_{\text{total}}). \quad (5)$$

$$\text{Min}(TC_{\text{total}}), \quad (6)$$

sujeito a

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (B_j A_i) X_{ij} \geq \bar{A}_i, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j=1, \dots, k, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^k X_{ij} \leq (k/m) \quad i=1, \dots, n, \quad (9)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1, \quad i = 1:n \text{ e } j = 1:k. \quad (10)$$

onde:

EB_{total} e TC_{total} estão definidos em (3) e (4) respectivamente;

B_j é a área do talhão J (ha);

A_i é a produtividade de POL da variedade i (ton.ha⁻¹);

\bar{A} é a demanda de POL da usina variedade i (ton.);

k é o número de talhões para plantio;

m é o número máximo de talhões que as variedades podem ser plantadas.

Este modelo consiste em maximizar o balanço econômico total do processo de coleta do resíduo de colheita (5) e minimizar o custo total para transferência do palhicho do campo para o centro de processamento (6). A restrição (7) garante a demanda de sacarose da usina, as restrições (8) garantem a exigência da usina de plantar uma única variedade por talhão, as restrições (9) impõem um limitante superior sobre o número de talhões que cada variedade deve ser plantada. As restrições (10) definem as variáveis do modelo como variável binária.

4 Técnica fuzzy para otimização multiobjetivo

Seja o modelo linear multiobjetivo (PLMO)

$$\text{Otimizar } Z = Cx$$

$$\text{s.a. } Ax \leq b \quad (11)$$

$$x \in \{0, 1\}^n$$

Em que $Z = (z_1, z_2, \dots, z_k)^T$ é um vetor objetivo, C é uma matriz k×n de valores constantes, x é um vetor n×1 de variáveis de decisão, A é uma matriz m×n de valores constantes e b é um vetor m×1 de valores constantes.

4.1 Abordagem multiobjetivo Fuzzy

Considere (11) na forma clássica geral

$$\begin{aligned} \text{Max } Z_1 &= C_1 \\ \text{Min } Z_2 &= C_2x \\ \text{s.a. } Ax &\leq b \\ x &\in \{0,1\}^n \end{aligned} \tag{12}$$

em que $Z_1 = (z_1, z_2, \dots, z_{k_1})^T$ e $Z_2 = (z_{k_1+1}, z_{k_1+2}, \dots, z_k)^T$ são vetores objetivos, C_1 é uma matriz $k_1 \times n$ e C_2 uma matriz $(k-k_1) \times n$ de valores constantes, os outros termos estão definidos como em (11).

A técnica fuzzy indica que se deve considerar (12) como um problema de otimização fuzzy

$$\begin{aligned} \text{Determine } x \\ \text{s.a. } C_1x &\geq_f p_1 \\ C_2x &\leq_f p_2 \\ Ax &\leq b \\ x &\in \{0,1\}^n \end{aligned} \tag{13}$$

onde \geq_f (lê-se “aproximadamente maior ou igual a”) e \leq_f (lê-se “aproximadamente menor ou igual a”) indicam o nível fuzzy, ou seja, o quanto de incerteza há no parâmetro. Os vetores objetivos (níveis desejados) p_1 e p_2 são os valores ótimos correspondentes a cada objetivo sobre $F = \{x \in \{0,1\}^n / Ax \leq b\}$.

Para definir a função de pertinência de cada objetivo fuzzy precisamos de um “nível de tolerância” (violação máxima permitida para o nível desejado), e calculamos como segue em (Leberling, 1981).

1. Para cada função objetivo não redundante Z_1, Z_2, \dots, Z_k de (11) existe uma única solução ótima $x_1^0, \dots, x_i^0, \dots, x_k^0 \in F$,

$$z_1(x) \leq z_1(x_1^0) = z_1^0, \dots, z_{k_1}(x) \leq z_{k_1}(x_{k_1}^0) = z_{k_1}^0, \forall x \in F$$

e

$$z_{k_1+1}(x) \geq z_{k_1+1}(x_{k_1+1}^0) = z_{k_1+1}^0, \dots, z_k(x) \geq z_k(x_k^0) = z_k^0, \forall x \in F$$

2. Para cada solução ótima individual tem-se

$$x_i^0 \neq x_j^0 \quad \text{para } i \neq j \quad \text{e } i, j = 1, \dots, k$$

Além disso, define-se

$$z_j^L = \min\{z_j(x_1^0), \dots, z_i(x_1^0), \dots, z_j(x_k^0), i \neq j, j=1, \dots, k_1, \quad (14)$$

e

$$z_j^L = \min\{z_j(x_1^0), \dots, z_i(x_1^0), \dots, z_j(x_k^0), i \neq j, j=1, \dots, k_1, \quad (15)$$

então,

$$p_{1i} = z_i^0, \quad t_{1i} = z_i^0 - z_i^L > 0, \quad i=1, \dots, k_1 \quad (16)$$

$$p_{2i} = z_i^0, \quad t_{2i} = z_i^U - z_i^0 > 0, \quad i=k_1+1, \dots, k \quad (17)$$

Assim, a função de pertinência linear (Figura 1) dos objetivos fuzzy em (12) são determinados pelo correspondente nível desejado e nível de tolerância (16) e (17).

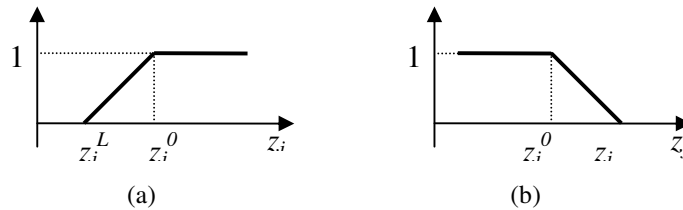


Figura 1 - Função de pertinência do objetivo fuzzy. (a) $j=1, \dots, k_1$, (b) $j=k_1+1, \dots, k$.

Finalmente, o problema (12) é equivalente a

$$\begin{aligned} & \max \quad \alpha \\ \text{s.a.} \quad & 1 + \frac{(C_1 x)_j - p_{1j}}{t_{1j}} \geq \alpha, \quad j=1, \dots, k_1 \\ & 1 + \frac{p_{2j} - (C_1 x)_j}{t_{2j}} \geq \alpha, \quad j=k_1+1, \dots, k \\ & Ax \leq b \\ & x_j \in \{0,1\}, \quad j=1, \dots, k; \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \end{aligned} \quad (18)$$

Note que, $\alpha \in [0,1]$ e indica o nível desejado e nível de tolerância fuzzy.

4.2 Metodologia para resolução do Problema de Programação Linear 0-1

Usando a ideia de Zimmermann et al., 1984, a equação (18) é reformulada como:

$$\max \left\{ 0, \min \left[1, 1 + \max_x \min_i \left(\sum_{j=1}^{k_1} c_{1ij}^1 x_j - p_{1j}^1, p_{2j}^1 - \sum_{j=k_1+1}^k c_{2ij}^1 x_j \right) \right] \right\} \quad (19)$$

s.a.

$$Ax + S = b, x_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, n, S \geq 0, S \in \mathbb{R}^m$$

$$\text{Em que } c_{1ij}^1 = \frac{c_{1ij}}{t_{1j}}, \quad c_{2ij}^1 = \frac{c_{2ij}}{t_{2j}}, \quad p_{1j}^1 = \frac{p_{1j}}{t_{1j}} \quad \text{e} \quad p_{2j}^1 = \frac{p_{2j}}{t_{2j}}.$$

$$\text{Seja } \bar{\alpha} = \max_x \min_i \left(\sum_{j=1}^{k_1} c_{1ij}^1 x_j - p_{1j}^1, p_{2j}^1 - \sum_{j=k_1+1}^k c_{2ij}^1 x_j \right), \text{ então de (19) tem-se}$$

$$\max \{0, \min[1, 1 + \bar{\alpha}]\}$$

s.a.

$$Ax + S = b, S \geq 0, x_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, n$$

(20)

$$\text{Assim } \bar{\alpha} = \max_x \min_i \left(\sum_{j=1}^{k_1} c_{1ij}^1 x_j - p_{1j}^1, p_{2j}^1 - \sum_{j=k_1+1}^k c_{2ij}^1 x_j \right), \text{ tem-se, portanto a}$$

desigualdade

$$\bar{\alpha} \leq \min_i \max_x \left(\sum_{j=1}^{k_1} c_{1ij}^1 x_j - p_{1j}^1, p_{2j}^1 - \sum_{j=k_1+1}^k c_{2ij}^1 x_j \right) \quad (21)$$

O lado direito da equação (21) é um limitante superior para $\bar{\alpha}$. Esta equação é importante para sugerir um algoritmo *branch and bound* no qual está aninhado dentro de um processo LIFO (*last-in-first-out* – último a entrar primeiro a sair).

De acordo com Zimmermann et al. 1984 e Taha, 1975 antes usar o algoritmo *branch and bound*, são definidos alguns símbolos.

Sejam N o conjunto de índices das variáveis e M o conjunto de índices das restrições. $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $M = \{1, \dots, m\}$. Seja J um subconjunto ordenado de N tal que cada elemento de J tem um sinal positivo ou um sinal negativo e pode ou não estar em destaque. O sinal dos elementos em J indica o valor atribuído à variável. Por exemplo, $J = \{3, -2\}$ significa $x_3=1$ e $x_2=0$. O conjunto $N-J$ contém os índices das variáveis livres, ou seja, que não tem atribuído um valor numérico 0 ou 1. J pode ser visto como um nó na árvore do algoritmo *branch and bound* e contém todas as informações relevantes sobre as variáveis que não são livres nesta fase. Defina $A = \{j \in N-J / a_{ij} \geq 0, \forall i \text{ tal que } S_i < 0\}$, que representam as variáveis livres, que se for aumentar o nível da árvore não se pode,

eventualmente, melhorar a infactibilidade da solução atual. Isto implica que todo $x_j, j \in A$, deve ser excluída como não promissora. Finalmente, seja J' o *complemento* de J , um conjunto ordenado tal que $N=J \cup J'$, em que J' é um conjunto com os elementos de $N-J$. Se algum elemento de J' for positivo ele será chamado de complemento não nulo.

As ramificações são feitas por valores calculados com base em (20) ou (21), respectivamente, para cada nó não finalizado. Se aumentar um limitante e $S_i, \forall i / S_i < 0$, um índice da variável livre pode ser movido para J , indo do nó J_t para o nó J_{t+1} .

Primeiro faz $J_t = \emptyset$ e cada um dos nós seguintes são testados como descrito em Taha, 1975. Se um ramo da árvore for sondado, um novo nó é selecionado para ser explorado. O nó é selecionado de acordo com a ordem dos elementos de J , considerando também se eles são ou não destacados. A seguinte regra é aplicada: O elemento da direita em J não destacado é destacado e todos os elementos da direita (se existirem) são excluídos de J . Um elemento destacado de J indica que devemos interromper a exploração, pois não há mais ramos ou não há solução melhor.

Em mais detalhe, defina um dado nó J_t :

$$BL(J_t) = \min_i \max_{x_j, j \in N-J} \left(\sum_{j \in N-J_t} c_{1ij}^1 x_j + \sum_{\substack{j \in J_t \\ j > 0}} c_{1ij}^1 - p_{1j}^1, p_{2j}^1 - \sum_{j \in N-J_t} c_{2ij}^1 x_j - \sum_{\substack{j \in J_t \\ j > 0}} c_{2ij}^1 \right)$$

é um limitante superior de $\bar{\alpha}$ para qualquer complemento J_t . Este pode ser facilmente calculado por:

$$BL(J_t) = \min_i \left(\left(\sum_{\substack{j \in J_t \\ j > 0}} c_{1ij}^1 - p_{1j}^1 \right) + \sum_{j \in N-J_t} \max(0, c_{1ij}^1), \left(p_{2j}^1 - \sum_{\substack{j \in J_t \\ j > 0}} c_{2ij}^1 \right) - \sum_{j \in N-J_t} \min(0, c_{2ij}^1) \right)$$

Se $BL(J_t)$ é menor do que o L de uma solução conhecida x

$$L = \min_i \left\{ \sum_j c_{1ij}^1 x_j - p_{1j}^1, p_{2j}^1 - \sum_j a_{2ij}^1 x_j \right\} \text{ (Chamada solução potencial com } L \text{ igual ao}$$

valor potencial), então todo o nó $J_t \neq \emptyset$ ramificado da árvore terá solução factível inferior a melhor solução anterior.

Se $BL(J_t) > L$, uma variável apropriada para ramificação será selecionada, boas escolhas podem encurtar a busca da solução consideravelmente.

Primeiro descarta-se complementos infactíveis. Para tal, seja $N_t^1 = N - J_t - A_t$. Se $N_t^1 = \emptyset$, qualquer complemento de J_t é factível, entretanto J_t é descartado para todo complemento que tenha variáveis não zero.

$$\text{Se } N_t^1 \neq \emptyset, \text{ seja } C_t = \left\{ i \in M/S_i^t < 0, \sum_{j \in N_t^1} a_{ij}^- > S_i^t \right\}, \text{ onde } a_{ij}^- = \min(0, a_{ij}) .$$

Existem duas alternativas: se $C_t \neq \emptyset$, então todos os complementos não nulos de J_t serão infactíveis para alguma restrição, também, para cada $j \in N_1^t$ os seguintes dois limitantes são calculados: $BL(J_t \cup \{j\})$ e $BL(J_t \cup \{-j\})$.

Se qualquer variável $j \in N_1^t$, ambos $BL(J_t \cup \{+j\}) < L$ e $BL(J_t \cup \{-j\}) < L$, então a busca em ramos deixados para trás é iniciada pela mesma razão anterior.

Defina:

$$N_{+1} = \{ j \in N_1^t / BL(J_t \cup \{+j\}) < L \text{ e } BL(J_t \cup \{-j\}) > L \}.$$

$$N_{-1} = \{ j \in N_1^t / BL(J_t \cup \{+j\}) > L \text{ e } BL(J_t \cup \{-j\}) < L \}.$$

$$N_1 = \{ j \in N_1^t / BL(J_t \cup \{+j\}) > L \text{ e } BL(J_t \cup \{-j\}) > L \}.$$

Se $N_{+1} \cup N_{-1} \neq \emptyset$, então: adicione $\{-j\}$ em J_t se $j \in N_{+1}$ ou adicione $\{+j\}$ em J_t se $j \in N_{-1}$. Finalmente, se $N_1 \neq \emptyset$, a variável a ser ramificada é escolhida heurísticamente usando qualquer das três regras seguintes:

A) Seleccione $j \in N_1^t$ para o qual $|BL(J_t \cup \{+j\}) - BL(J_t \cup \{-j\})|$ é mínimo.

B) Seleccione $j \in N_1^t$ para o qual $\max\{BL(J_t \cup \{+j\}), BL(J_t \cup \{-j\})\}$ é mínimo.

C) Seleccione $j \in N_1^t$ para o qual $\min\{BL(J_t \cup \{+j\}), BL(J_t \cup \{-j\})\}$ é mínimo.

Depois que um j apropriado for selecionado, uma ramificação no ramo terá o maior BL. As regras A e B destinam-se a reduzir, tanto quanto possível as chances de que as ramificações tenham alternativas a serem exploradas mais tarde. A regra C destina-se a reduzir as chances de término no ramo selecionado. De acordo com Zimmermann et al., 1984 a regra A é usada primeiramente, somente quando a regra A não leva a uma decisão única é que a regra B é usada, e se uma variável ainda não foi determinada, a regra C é aplicada. Se nenhuma das regras conduz a uma solução única, o mínimo j é escolhido.

Inicialmente L é definido como -1 . Se L atinge 0 (zero), o algoritmo termina: $\alpha^* = 1$ e a solução é ótima. Se $L = -1$ e $\alpha^* = 0$, um x qualquer é solução do problema. Caso contrário $\alpha^* = 1+L$ e a solução é ótima.

O processo é interrompido quando todos os ramos são descartados ou quando a solução é inferior à melhor solução.

5 Aplicações

Dados reais, fornecidos por uma usina da região de Botucatu SP, foram usados para 10 talhões com uma área total de 207,47 hectares, e 5 variedades: RB72454, RB806043, RB855536, SP791011 e RB855113.

As distâncias dos talhões ao centro de processamento variam de 12 a 22 km. Dados de produtividades de sacarose para cada variedade são mostrados na Tabela 1 (Sartori, 2001).

Tabela 1 - Produtividade de sacarose por variedade, média de 4 cortes

i - Variedades	Sacarose (t.ha ⁻¹)
1 - RB72454	15,26
2 - RB806043	14,48
3 - RB855536	15,23
4 - SP791011	15,80
5 - RB855113	17,54

* Fonte (Sartori, 2001)

A produtividade média em 4 cortes de palhico da cana-de-açúcar para cada variedade em m³.ha⁻¹ (dado da usina) e em m³.ton⁻¹(Sartori, 2001) está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Produtividade de palhico da cana-de-açúcar, em média de 4 cortes, para cada variedade

Variedades	Volume (m ³ .ton ⁻¹)	Volume por área (m ³ .ha ⁻¹)
1 - RB72454	34,02	807,12
2 - RB806043	28,14	590,95
3 - RB855536	30,42	818,3
4 - SP791011	35,64	858,56
5 - RB855113	32,61	958,08

O volume de carga do caminhão é 54,57 m³; este foi escolhido por não afetar a compactação do solo (dados da usina).

Os custos para recolhimento do palhico de cada variedade de cana-de-açúcar (C_i) em US\$.m⁻³ são mostrados na Tabela 3, este foram calculados com auxílio da equação (1) e utilizando os dados de custos para carregamento do caminhões (C_c), eleiramento da palha após três dias pós colheita de cana crua (US\$.ton⁻¹) e o custo de transporte para variedade, os quais foram fornecidos pela já citada usina.

Tabela 3 - Custo de transferência de 1 m³ de palhico do campo para o centro de processamento, para cada variedade

Variedades	Custo de transferência, C _i (US\$.m ⁻³)
1 - RB72454	0,059
2 - RB806043	0,071
3 - RB855536	0,066
4 - SP791011	0,056
5 - RB855113	0,061

A Solução obtida utilizando o modelo (5) - (10) proporcionou um custo de US\$ 77851,35 para o recolhimento da biomassa do campo e transporte para usina, e um

equilíbrio econômico de US\$ 60382,02 selecionando as variedades RB855113 para os talhões 1, 3 e 5 (61,82 ha), RB806043 para os talhões 2, 4 e 9 (64,87 ha), RB72454 para talhão 6 (18,25 ha) e RB855536 para os talhões 7, 8 e 10 (62,50 ha), produzindo um total de 3.254,01 toneladas de sacarose.

Conclusões

A resolução do modelo usando técnicas de programação linear fuzzy permitiu fazer uma escolha de quais variedades da cana-de-açúcar devem ser plantadas em quais talhões de forma a otimizar o balanço econômico do manejo do palhicho, visando a geração de energia. O modelo permite determinar a área de plantio para cada variedade selecionada, a produção total de sacarose, assim como o custo otimizado para a retirada do resíduo de colheita da cana-de-açúcar do campo.

Os resultados obtidos pela aplicação da metodologia indicam que esta é uma potencial ferramenta para escolha de variedades da cana-de-açúcar a ser plantada, visando a redução do custo de transferência do palhicho do campo para o centro de processamento e geração de energia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (No. 2009/14901-4, No. 2010/07585-6 e No. 2014/01604-0), CNPq(No. 303267/2011-9), FUNDUNESP, CAPES e PROPG UNESP.

FLORENTINO, H. O.; CANTÃO, L. A. P.; MORENO, E. V.; SARTORI, M. M. P. A fuzzy approach to the optimization problem of the economic balance associated with the use of the sugarcane harvesting residual. *Rev. Bras. Biom.*, São Paulo, v.33, n.1, p.63-77, 2015.

- *ABSTRACT: Brazil is the world's largest producer of sugarcane and this production is concentrated in Center-South region. In the season 2013/14 the sugarcane production was 658.8 million tons, which represent an increase of 11.9% when compared with 2012/13 (588.9 million tons). Despite the fact that the sugarcane is a positive influence to the Brazilian economy, raise environmental concerns related to the sugarcane industry processes. The pre-harvest burning of sugarcane is one of the most sensitive environmental issues faced by cane growers. This practice has been questioned and abolished in some areas. But, with decreasing in the number of burnings, the residue derived from the harvest of sugarcane without prior burning become an important matter for researchers and producers. If left on the soil, it may result in diseases and plagues, compromising the regrowth. On the other hand its removal is very expensive due to the several processes involved (windrowing, compaction, transportation, etc.). Therefore, the researchers and managers are studying an efficient and economical way to use the harvesting residual biomass. The purpose of this work is to develop a mathematical model to help choosing among the available sugarcane varieties in order to maximize the economic balance of transportation and processing of the sugarcane residual biomass, address sucrose production and planting area constraints. The model obtained correspond to Linear Fuzzy Programming 0-1. The results show the viability of the model in selecting sugarcane varieties, which provide an optimized economic balance for the process of managing of residual biomass of the sugarcane harvest.*
- *KEYWORDS: Mathematical model; residual biomass; sugarcane; fuzzy 0-1 linear programming.*

Referências

- AMID, A., GHODSYPOUR, S. H., O'BRIEN, C. A weighted max-min model for fuzzy multi-objective supplier selection in a supply chain. *Int. J. Productions Economic*, v. 131, p. 139-145, 2011.
- BUDDADEE, B., WIROJANAGUD, W., WATTS, D. J., PITAKASO, R. The development of multi-objective optimization model for excess bagasse utilization: A case study for Thailand. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 28, p. 380-391, 2008.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Available in: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 03.Jul.2014.
- GRONOW, M., GÜNTHER, H. –O., WESTINNER, R. Supply optimization for the production of raw sugar. *Int. J. Production Economics*, v. 110, p. 224-239, 2007.
- HERRERA, F., J. L. VERDEGAY and H. J. Zimmermann. Boolean programming problems with fuzzy constraints, *Fuzzy Sets and Systems*, v. 56, p. 285-293, 1993.
- IBRAHIM, A. B. Fuzzy goal programming for solving decentralized bi-level multi-objective programming problems. *Fuzzy sets and systems*, v. 160, p. 2701-2713, 2009.
- LEBERLING, H. On finding compromise solutions in multicriteria problems using the fuzzy min-operator, *Fuzzy Sets and Systems*, v. 6, p. 105-118, 1981.
- LIANG, T.-F. Distribution planning decisions using interactive fuzzy multi-objective linear programming. *Fuzzy sets and systems*, v. 157, p. 1303-1316, 2006.
- LUHANDJULA, M. K. Compensatory operators in fuzzy linear programming with multiple objectives, *Fuzzy Sets and Systems*, v. 8, p. 245-252, 1982.
- MELE, F. D., KOSTIN, A. M., GOSÁLBEZ, G. G., Jiménez, L. Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 50, p. 4939-4958, 2011.
- PAIVA, R. P. O, MORABITO, R. An optimization model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. *Ann. Oper. Res.*, v. 169, p. 117-130, 2009.
- RIPOLI T. C. C.; RIPOLI M. L. C. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. Piracicaba SP: FCA/UNESP, 2004.
- ROMMELFANGER, H. AND SLOWINSKI, R. Fuzzy linear programming with single or multiple objective functions, *Decision Analysis Operations Research and Statistics of Handbooks of Fuzzy Sets*, 1, In R. Slowinski (ed), Luwer Academic Publishers, Boston, p. 179-213, 1998.
- SARTORI, M. M. P. *Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar*. Thesis, Botucatu SP, Brasil, 2001.
- SCARPARI, M. S., BEAUCLAIR, E. G. F. de. Optimized agricultural planning of sugarcane using linear programming. *Revista Investigacion Operacional*, v. 31, n. 2, p. 126-132, 2010.

SHAW, K., SHANKAR, R., YADAV, S. S., THAKUR, L. S. Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain. *Expert systems with applications*, v. 39, p. 8182-8192, 2012.

TAHA, H. A. *Integer Programming: Theory, applications and computations*. Academic Pres. New York, 1975.

UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. Available in: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em 03/Julho/2014.

WU, D. D., ZHANG, Y., WU, D., OLSON, D. L. Fuzzy multi-objective programming for supplier selection and risk modeling: a possibility approach. *European Journal of Operational Research*, v. 200, n. 3, p. 774-787, 2010.

ZIMMERMANN, H. J. and POLLATSCHEK, M. A. Fuzzy 0-1 linear programs, in: H.J. Zimmermann, L. A. Zadeh and B. R. Gaines, Eds., *Fuzzy Sets and Decision Analysis* (North-Holland, Amsterdam) p. 133-145, 1984.

Recebido em 03.08.2014

Aprovado após revisão em 05.12.2014