

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA APLICADA AO  
APROVEITAMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**GILMAR TOLENTINO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP  
Fevereiro – 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA APLICADA AO  
APROVEITAMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**GILMAR TOLENTINO**

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Helenice de Oliveira Florentino Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP

Fevereiro – 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO  
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

T649p Tolentino, Gilmar, 1976-  
Programação linear inteira aplicada ao aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar / Gilmar Tolentino.- Botucatu : [s.n.], 2007.  
xvii, 70 f. : il. color., gráfs, tabs.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2007  
Orientador: Helenice de Oliveira Florentino Silva  
Inclui bibliografia.

1. Cana-de-açúcar. 2. Programação linear. 3. Resíduos - Colheita. 5. Modelos matemáticos. I. Florentino, Helenice de Oliveira. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS**  
**CAMPUS DE BOTUCATU**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: "PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA APLICADA AO  
APROVEITAMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR"**

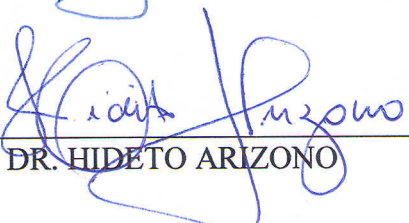
**ALUNO: GILMAR TOLENTINO**

**ORIENTADOR: PROF<sup>a</sup> DR<sup>a</sup> HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA**

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF<sup>a</sup> DR<sup>a</sup> HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ANTONIO ROBERTO BALBO

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. HIDEITO ARIZONO

Data da Realização: 26 de fevereiro de 2007.

*Dedico essa dissertação...*

*À minha esposa Sabrina Ap. dos Santos Tolentino, meu filho  
Guilhermy dos Santos Tolentino, pelo amor e compreensão nas horas de dificuldades e por  
acreditar nos meus ideais.*

*Aos meus pais Jovito e Maria, pelo amor que sempre demonstraram,  
pela educação que me passaram e pelo incentivo de buscar sempre algo novo para minha  
formação.*

*Ofereço...*

*Ao meu pai **Jovito de Oliveira Tolentino** e minha mãe **Maria de Jesus Tolentino** que mesmo não tendo condições suficientes, sempre incentivaram-me a continuar estudando.*

Agradecimentos...

Agradeço em primeiro lugar a Deus por toda ajuda e proteção dada a mim e a minha família.

A minha orientadora Profa. Dra. Helenice de Oliveira Florentino Silva, pela confiança, pela compreensão, pela amizade e apoio em todos os momentos na elaboração deste trabalho.

A Profa. Dra. Maria Márcia Pereira Sartori, pela amizade e pelo auxílio em partes deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Antônio Roberto Balbo, pela amizade, conhecimento adquirido e por sempre estar disposto a me ajudar.

Aos meus Mestres da UNESP, aos quais devo parte da minha formação acadêmica;

A FAPESP, pelo apoio financeiro aos projetos desta linha de pesquisa (proc. 01/10393-2, 04/08993-0 e 06/02476-9);

Aos amigos da pós-graduação, que foram muitos, pela ajuda e incentivo para que este momento se tornasse uma realidade em minha carreira acadêmica.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE QUADROS .....	VIII
LISTA DE FIGURAS .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
LISTA DE EQUAÇÕES.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XVI
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	7
4.1 Produção de cana-de-açúcar no Brasil.....	7
4.2 Cultivo da cana-de-açúcar.....	9
4.2.1 Plantio da cana-de-açúcar.....	10
4.2.2 Colheita da cana-de-açúcar.....	11
4.3 Poluições causadas pela queima dos canaviais.....	13
4.4 Resíduos provenientes da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia.....	16
4.5 Aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar.....	19
4.6 Sistemas de recolhimento do palhiço.....	22
4.7 Otimização.....	26
4.7.1 A Programação Linear.....	27
4.7.2 Problemas de programação linear inteira.....	29
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
5.1 Considerações iniciais.....	32
5.2 Modelagem de problemas de programação linear inteira binária (PPLIB).....	33
5.3 Método para resolução de um PPLIB.....	33
5.4 Custo do aproveitamento do palhiço.....	35
5.5 Balanço de energia para o aproveitamento do palhiço.....	37



5.6 Material.....	39
6 RESULTADO E DISCUSSÃO.....	40
6.1 Modelagem matemática.....	41
6.1.1 Minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar.....	41
6.1.2 Balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar....	42
6.1.3 Minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar, com restrição sobre a produção de energia.....	43
6.1.4 Balanço de energia do palhiço da cana-de-açúcar, com restrição sobre o custo para a transferência destes resíduos até a usina.....	45
6.2 Aplicação dos modelos.....	46
6.2.1 Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar.....	47
6.2.2 Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar.....	50
6.2.3 Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o balanço de energia.....	52
6.2.4 Resultado da aplicação do modelo de maximização de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o custo de coleta.....	54
7 CONCLUSÃO.....	57
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

## LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1: Produção de biomassa seca pela variedade SP 71-6163.....	18
Quadro 2: Média do teor de umidade ( $U(\%)$ ), poder calorífico superior (PCI), poder calorífico inferior (PCU) e poder calorífico superior (PCS) dos componentes do palhiço de cinco variedades de cana-de-açúcar para quatro colheitas.....	21
Quadro 3: Potencial de energia primária de uma tonelada de cana-de-açúcar.....	22
Quadro 4: : Estimativa do volume do palhiço em toneladas da variedade $i$ ( $V_i$ ), produtividade de palhiço da variedade $i$ ( $P_{Bi}$ ), poder calorífico útil do palhiço produzido pela variedade $i$ ( $Ec_{Bi}$ ), produtividade de açúcar fermentescível (POL) da variedade $i$ ( $A_i$ ), estimativa do volume do palhiço por unidade de área plantada da variedade $i$ ( $Q_i$ ) e produtividade de fibra da variedade $i$ ( $F_i$ ).....	25
Quadro 5: Custos e consumo de combustível e energia dos maquinários utilizados para a coleta do palhiço e recomendações de teores de Pol e fibra da cana: custo para enleirar, compactar e carregar o palhiço ( $C_{ecc}$ ), consumo de combustível do caminhão usado no transporte do palhiço ( $C_o$ ), preço de um litro de combustível ( $P$ ), energia consumida pelas máquinas para enleirar e compactar uma tonelada de resíduo ( $Ec_{EC}$ ), energia consumida pela máquina para carregar o caminhão com uma tonelada do resíduo ( $Ec_C$ ), energia consumida pelo caminhão para o transporte do resíduo ( $Ec_T$ ), capacidade de carga do caminhão a ser usado no transporte do palhiço ( $V_c$ ), quantidade mínima recomendada de POL ( $\bar{P}$ ) e produção mínima e máxima recomendados para o teor de fibra ( $\bar{F}_I$ e $\bar{F}_S$ ).....	26
Quadro 6: Área do talhão $j$ ( $L_j$ ) e distância do talhão $j$ até a usina ( $D_j$ ).....	47
Quadro 7: Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar.....	48

Quadro 8: Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com a inclusão das restrições (41).....	50
Quadro 9: Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar.....	51
Quadro 10: Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar com a adição das restrições (41)....	52
Quadro 11: Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o balanço de energia.....	53
Quadro 12: Resultado do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o balanço de energia com as restrições (41).....	54
Quadro 13: Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar com restrições sobre o custo de coleta.....	55
Quadro 14: Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar com restrições sobre o custo de coleta com as restrições (41).....	56

**LISTA DE FIGURAS**

	Página
Figura 1: Produção de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, comparada a do Brasil na safra 2006/2007.....	8
Figura 2: Produção brasileira de cana-de-açúcar nos últimos anos.....	8
Figura 3: Queima da cana-de-açúcar para a colheita, causando a poluição ambiental.....	14
Figura 4: Resíduos da colheita da cana crua depositada no solo .....	17
Figura 5: Máquina utilizada para enleirar o palhiço.....	23
Figura 6: Fardo prismático do palhiço.....	23
Figura 7: Fardo cilíndrico do palhiço .....	23
Figura 8: Operação de carregamento do palhiço para o transporte até a usina.....	24

**LISTA DE EQUAÇÕES**

	Página
$PCI = PCS - 600 \cdot \left( \frac{9H}{100} \right)$ .....	19
$PCU = PCI \left[ \frac{(100 - U)}{100} \right] - 6H$ .....	20
$C_i = \frac{Cecc}{V_i}$ .....	36
$CC_i = Q_i C_i$ .....	36
$C_{D_j} = D_j C_o P$ .....	36
$CT_{ij} = \left( \frac{Q_i}{V_c} \right) C_{D_j}$ .....	37
$CC_{ij} = (CC_i + CT_{ij}) L_j$ .....	37
$EB_{ij} = E_{c_{Bi}} P_{Bi} L_j$ .....	38
$ET_{Bij} = E_{ECij} + E_{Cij} + E_{Tij}$ .....	38
$E_{ECij} = E_{CEC} L_j P_{Bi}$ .....	38
$E_{Cij} = E_{CC} L_j P_{Bi}$ .....	38
$E_{Tij} = E_{c_T} D_j \frac{Q_i L_j}{V_c}$ .....	38
$BE_{ij} = EB_{ij} - ET_{Bij}$ .....	39
$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij}$ .....	41
$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1$ .....	41
$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1$ .....	41
$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i L_j X_{ij} \geq \bar{PT}$ .....	41

$$\bar{F}_1 T \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k F_i L_j X_{ij} \leq \bar{F}_s T \dots\dots\dots 41$$

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k B E_{ij} X_{ij} \dots\dots\dots 42$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k B E_{ij} X_{ij} \geq E \dots\dots\dots 44$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k C C_{ij} X_{ij} \leq C \dots\dots\dots 45$$

$$\sum_{j=1}^k X_{ij} \leq M \dots\dots\dots 49$$

## LISTA DE ABREVIATURAS E UNIDADES

Dólar.....	US\$
Litro.....	L
Dólar por litro.....	US\$.L <sup>-1</sup>
Dólar por hectare.....	US\$.ha <sup>-1</sup>
Dólar por tonelada.....	US\$.t <sup>-1</sup>
Metro.....	m
Dólar por metro cúbico.....	US\$.m <sup>-3</sup>
Megagrama por hectare .....	Mg.ha <sup>-1</sup>
Tonelada.....	t
Hectare.....	ha
Toneladas por dia .....	t.dia <sup>-1</sup>
Gás Carbônico.....	CO <sub>2</sub>
Graus centígrados .....	°C
Óxido Nitroso.....	N <sub>2</sub> O
Óxido de Nitrogênio.....	NO <sub>2</sub>
Metano.....	CH <sub>4</sub>
Vapor de água.....	H <sub>2</sub> O
Ozônio.....	O <sub>3</sub>
Clorofluorcarbonetos.....	CFC
Monóxido de Carbono.....	CO
Quilo joule.....	kJ
Quilo joule por quilograma.....	kJ.kg <sup>-1</sup>
Mega joule.....	MJ
Mega Joule por quilograma.....	MJ.kg <sup>-1</sup>
Mega Joule por tonelada.....	MJ.t <sup>-1</sup>
Mega Joule por quilômetro.....	MJ.km <sup>-1</sup>
Caloria.....	cal

Quilocaloria.....	kcal
Gigacaloria.....	Gcal
Caloria por grama.....	cal.g <sup>-1</sup>
Quilocaloria por quilograma.....	kcal.kg <sup>-1</sup>
Gigacaloria por ano.....	Gcal.ano <sup>-1</sup>
Teor do elemento hidrogênio no material.....	H
Teor de umidade da biomassa com base em peso úmido.....	U
Quilowatts.....	KW
Quilômetro.....	km
Megawatts.....	MW
Quilowatts horas.....	KWh
Toneladas equivalente de petróleo.....	TEP
Nitrogênio .....	N
Potencial hidrogeniônico .....	pH
Potássio .....	K
Quilograma .....	kg
Litro por quilômetros.....	L.km <sup>-1</sup>
Quilograma por hectare .....	kg.ha <sup>-1</sup>
Teor de sacarose .....	pol
Metro cúbico.....	m <sup>3</sup>
Metro cúbico por hectare.....	m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup>
Metro cúbico por tonelada.....	m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup>
Toneladas por hectare .....	t.ha <sup>-1</sup>
Poder calorífico inferior.....	PCI
Poder calorífico superior.....	PCS
Poder calorífico útil.....	PCU
Problema de programação linear.....	PPL
Problema de programação linear inteira.....	PPLI
Problema de programação linear inteira binária.....	PPLIB



Problema de programação linear inteira mista.....	PPLIM
Produção mínima de energia no aproveitamento do palhicho.....	E
Área total disponível para o plantio.....	T
Número máximo de talhões para o plantio da variedade i.....	M
Custo máximo para a transferência do palhicho do campo até a usina.....	C

## LISTA DE SÍMBOLO

Custo de coleta do palhiço produzido pela variedade i por metro cúbico.....	$C_i$
Custo para enleirar e carregar o palhiço no caminhão por tonelada.....	$C_{ecc}$
Volume ocupado por uma tonelada do palhiço produzido pela variedade i .....	$V_i$
Volume do palhiço produzido pela variedade i por hectare.....	$Q_i$
Distância do talhão j até a usina.....	$D_j$
Custo para percorrer uma única vez a distância do talhão j até a usina.....	$C_{Dj}$
Consumo do combustível do caminhão a ser usado.....	$C_o$
Preço do combustível.....	$P$
Volume disponível no caminhão em $m^3$ .....	$V_c$
Custo para transportar o palhiço produzido pela variedade i plantada no talhão j até a usina.....	$CT_{ij}$
Custo de coleta e transporte do palhiço produzido pela variedade i plantada no talhão j....	$CC_{ij}$
Energia proveniente do palhiço produzido pela variedade i plantada no talhão j.....	$EB_{ij}$
Energia calorífica do palhiço produzido pela variedade i.....	$EC_{Bi}$
Estimativa da quantidade de palhiço produzido pela variedade i.....	$P_{Bi}$
Área em hectare do talhão j.....	$L_j$
Total de energia gasta no processo de transferência do palhiço produzido pela variedade i plantada no talhão j até a usina.....	$ET_{Bij}$
Energia gasta para enleirar e compactar o palhiço produzido pela variedade i plantada no talhão j.....	$E_{ECij}$
Energia gasta para carregar o palhiço produzido pela variedade i plantada no talhão j no caminhão.....	$E_{Cij}$
Energia gasta para transportar o palhiço produzido pela variedade i plantada no talhão j até a usina.....	$E_{Tij}$
Energia consumida pelas máquinas, sob a forma de combustível, para enleirar e compactar o palhiço em $MJ.t^{-1}$ .....	$E_{CEC}$

Energia consumida pela máquina para a coleta do palhiço em $\text{MJ.t}^{-1}$ .....	$E_{cc}$
Energia consumida pelo caminhão em forma de combustível para o transporte do palhiço até a usina em $\text{MJ.km}^{-1}$ .....	$E_{CTj}$
Balanço de energia no aproveitamento do palhiço produzido pela variedade i, plantada no talhão j .....	$BE_{ij}$
Variável de decisão.....	$X_{ij}$
Quantidade mínima de fibra estabelecida para a variedade de cana-de-açúcar.....	$\bar{F}_i$
Quantidade máxima de fibra estabelecida para a variedade de cana-de-açúcar.....	$\bar{F}_s$
Quantidade mínima estabelecida para a POL da cana-de-açúcar.....	$\bar{P}$
Estimativa de produção de sacarose da variedade i.....	$A_i$
Estimativa do teor de fibra da variedade i.....	$F_i$

## 1 RESUMO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Esta cultura é primariamente produzida para obtenção de álcool e açúcar. A produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2006/2007 é estimada em 471,2 milhões de toneladas, superior em 9,2% a da safra anterior. Este aumento é devido ao clima, aos investimentos ocorridos nas indústrias atraídas pela crescente produção nacional de carros bicombustíveis e pelo aumento da venda de açúcar e álcool ao mercado externo. O crescimento acelerado dessa cultura fez com que alguns problemas surgissem como exemplo, a poluição ambiental, causada com a queima dos canaviais, para posterior colheita da cana-de-açúcar, tornando-se necessário a implantação de leis estaduais e federais proibindo esta prática. Com a proibição das queimadas nos canaviais, o palhiço derivado da colheita de cana-de-açúcar sem queima prévia, tornou-se foco para os pesquisadores e produtores. As vantagens no seu recolhimento, recuperação e aproveitamento têm mobilizado pesquisadores de universidades, gerentes e diretores de usinas, que estão interessados em encontrar a maneira mais produtiva, econômica e eficaz para este manejo. O presente trabalho propõe o uso da programação linear inteira binária para auxílio no estudo do balanço da energia e da viabilidade econômica do aproveitamento do palhiço para a produção de energia. Para isto, foram propostos modelos matemáticos para escolha das variedades de cana-de-açúcar que deverão ser plantadas nas áreas agrícolas da usina, que derivem palhiços com mínimo custo de manejo (enfardamento, recolhimento e transporte até a usina) e modelos para escolha das variedades de cana-de-açúcar que deverão ser plantadas nas áreas agrícolas da usina que ofereça um balanço ótimo de energia da

biomassa. Os modelos satisfazem as restrições de área para plantio e as necessidades da usina para atenderem as demandas de açúcar, álcool e produção de energia. Nesta proposta foram utilizadas técnicas de Programação Linear Inteira para formulação e resolução do modelo de otimização.

---

**Palavras-chave:** Cana-de-açúcar, palhão, modelos matemáticos, programação linear inteira.

## 2 SUMMARY

Brazil is the larger sugarcane producer of the world. This culture is primarily produced to obtain alcohol and sugar. The Brazilian production in the season 2006/2007 is estimated in 471,2 million tones, above 9,2% of the season previous. This increase is due to the climate, to the investments occurred in the industries attracted by the increasing national production dual fuel cars and by the increase of the sugar and alcohol sales to the international market. The accelerated growing of this culture appeared as environmental problems as environmental pollution, caused by burning of the sugarcane plantation for sugarcane harvest, being necessary the state and federal law implementation prohibiting this practical. With the burning limiting in the sugarcane plantations, the derivative trash of sugarcane harvest without previous burning, became focus to the researches and farmers. The advantages in its collecting, recuperation and utilization has mobilized university researches, plant manager and directors that are interested in find the form more productive, economic and effective for this management. The present work propose the use of the binary entire linear programming to aid in the energy balance and trash utilization economic viability study to energy production. For this, were proposed mathematical models to choose the sugarcane varieties that will must be planted in the agricultural areas of the plant, that derives trash with the minimum management cost (packing, collecting and transport until the plant) and models to choose of the sugarcane varieties that will must be planted in the agricultural areas of the plant, that offer a optimum biomass energy balance. The models satisfy the restrictions of planting area and the necessities of the plant to attend the sugar, alcohol demand and energy production. In

this study were used Entire Linear Programming technical to formulation and resolution of the optimization model.

---

**Key-words:** Sugarcane, trash, mathematical models, entire linear programming.

### 3 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido pela Índia e Austrália. A produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2006/2007 é estimada em 471,2 milhões de toneladas, superior em 9,2% a da safra anterior. Este crescimento ocorreu em função da expansão na área plantada, que passou de 5,8 para 6,2 milhões de hectares e de 3,4% na produtividade média, que atingiu  $76353\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (UNICA, 2006; CONAB, 2006; IBGE, 2006). O aumento da produção deve-se, em grande parte, à criação de veículos bicompostíveis e a alta do petróleo, pois estes fizeram o álcool hidratado ganhar espaço no mercado, promovendo uma ampliação na produção de cana (ORTOLAN, 2004).

Com o aumento na produção de cana, aumentaram também as dimensões dos problemas no setor sucroalcooleiro, como exemplo cita-se a poluição causada pela queima dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar para facilitar a colheita. Com isto, leis foram criadas com o intuito de diminuir e proibir esta prática e a mecanização da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia ganhou impulso. As possibilidades de barateamento dessa operação e maior produtividade de trabalho são os principais fatores que estão contribuindo para aceleração deste processo.

Sem queima prévia, a colheita de cana-de-açúcar, manual ou mecanizada, gera grande quantidade de resíduos na lavoura, conhecidos na literatura como palhiço (palhas, ponteiros e pequenos pedaços de colmos) que, se forem simplesmente abandonados no local de colheita, podem comprometer a próxima safra da cana-de-açúcar,



criar um ambiente favorável ao aparecimento de pragas e, além disso, pode ocorrer o fogo acidental destes resíduos na lavoura.

Muitos estudos mostram que o palhiço pode ser utilizado para produzir mais álcool, via hidrólise ou rotas de gaseificação, e/ou energia elétrica excedente, para ser adicionada à rede; portanto, o aproveitamento da energia primária da cana pode ser dobrado (MOREIRA, 2000). Assim, o palhiço tornou-se foco para os pesquisadores e produtores. As vantagens no seu recolhimento, recuperação e aproveitamento têm mobilizado pesquisadores de universidades, gerentes e diretores de usinas, que estão interessados em encontrar a maneira mais produtiva, econômica e eficaz para este manejo (BEEHARRY, 2001; SCHNEIDER et al. 2001; BEEHARRY, 2002).

O presente trabalho propõe o uso da programação linear inteira binária como auxílio no estudo do balanço da energia e da viabilidade econômica do aproveitamento do palhiço para a produção de energia. Foram propostos modelos para escolha das variedades de cana-de-açúcar que deverão ser plantadas nas áreas agrícolas da usina, que derivem palhiços com mínimo custo em seu manejo (enfardamento, recolhimento e transporte até a usina) e modelos para escolha das variedades de cana-de-açúcar que deverão ser plantadas nas áreas agrícolas da usina que ofereça um ótimo balanço de energia da biomassa. Os modelos satisfazem as restrições de área para plantio e as necessidades da usina para atenderem as demandas de açúcar, álcool e produção de energia. Para formulação e resolução destes modelos, utilizaram-se técnicas de Programação Linear Inteira.

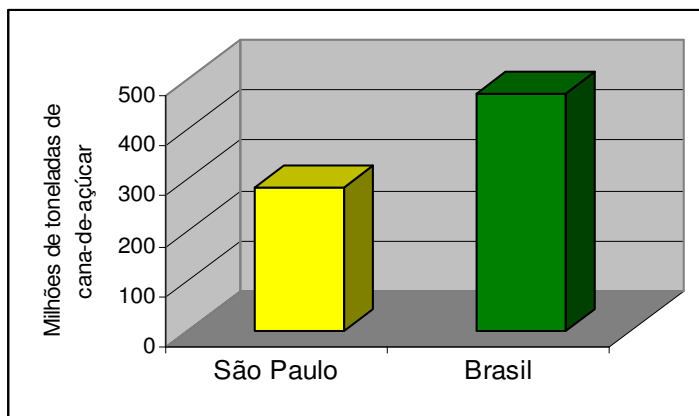
## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Produção de cana-de-açúcar no Brasil

A produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2006/2007 é estimada em 471,2 milhões de toneladas, superior em 9,2% a da safra anterior. O respectivo crescimento ocorreu em função da expansão de 5,5%, na área plantada, que passou de 5,8 para 6,2 milhões de hectares e de 3,4% na produtividade média, que passou de 73868kg.ha<sup>-1</sup> para 76353kg.ha<sup>-1</sup>. Este aumento é devido ao clima e aos investimentos ocorridos nas indústrias atraídas pelos preços de mercado. Desta forma o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. (CONAB, 2006)

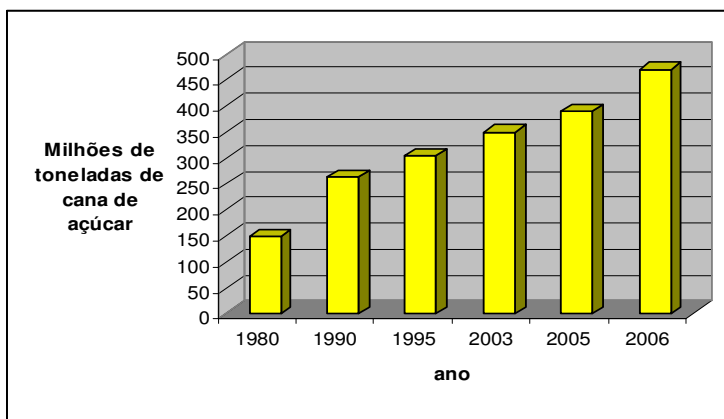
A região Centro-Sul é responsável por 86,8% da produção nacional, ocupa 81,4% da área a ser colhida e detém a maior produtividade média do país, de 81338kg.ha<sup>-1</sup>. A região Sudeste contribui com 325,9 milhões de toneladas, o correspondente a 69,4% da produção nacional e 80% da produção do Centro-Sul. A produção da região Norte-Nordeste é de 62,2 milhões de toneladas, correspondente a 13,2% da produção nacional, cultivada em uma área de 1,1 milhões de hectares, 18,6% da área a ser colhida no país (CONAB, 2006).

Os principais estados brasileiros produtores de cana-de-açúcar são: São Paulo com 282,6 milhões de toneladas (60%), Paraná com 36,75 milhões (7,8%), Minas Gerais com 30,15 milhões (6,4%), Alagoas com 23,56 milhões (5,0%), Goiás com 20,56 milhões (4,3%) e Pernambuco com 18 milhões (3,8%). (CONAB, 2006). A figura 1 mostra a produção de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, comparada a do Brasil na safra 2006/2007.



**Figura 1:** Produção de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, comparada a do Brasil na safra 2006/2007 (fonte: UNICA, 2006).

Nos últimos anos, o crescimento na produção de cana-de-açúcar no Brasil vem ocorrendo devido a vários fatos históricos e econômicos, conforme mostrado na figura 2. Os números mostrados para a produção atual de cana, são explicados pela crescente produção nacional de carros bicombustíveis e pelo aumento da venda ao mercado externo (ANFAVEA, 2006).



**Figura 2:** Produção brasileira de cana-de-açúcar nos últimos anos (fonte: UNICA, 2006; COGEN-SP, 2006; IBGE, 2006).

Além de seus produtos básicos, como açúcar e álcool, a cana-de-açúcar, através de seus subprodutos, é responsável por 307 centrais energéticas existentes no Brasil, 128 das quais estão no estado de São Paulo. Uma das diferenças importante do setor sucroalcooleiro brasileiro em relação ao de outros países é que toda produção da

cana-de-açúcar é feita sem a intervenção ou subsídios do governo, o que é ainda mais significativo ao se considerar a complexidade da cadeia produtiva do setor. (UNICA, 2006).

O rápido crescimento dessa cultura fez com que alguns problemas ligados ao setor sucroalcooleiro surgissem como exemplo, a poluição ambiental causada pela queima do palhiço para colheita manual. Este problema tem sido discutido por órgãos ambientais e governamentais. Algumas leis têm sido impostas estabelecendo prazos para acabar com a queima na pré-colheita, o que torna inevitável a colheita mecanizada de cana crua. Assim, o destino do resíduo proveniente da colheita da cana-de-açúcar crua tornou-se objeto de várias pesquisas. (SPAROVEK, 1997)

## **4.2 Cultivo da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) pertence à família das gramíneas e é mais cultivada nas regiões tropicais e subtropicais, devido à necessidade de uma época quente e chuvosa para o desenvolvimento vegetativo, e uma época fria e/ou seca para o enriquecimento em açúcares (FERNANDES, 1984).

Segundo Magalhães (1987), a temperatura influencia muito no desenvolvimento da cana-de-açúcar. Temperaturas altas são bem aceitas pela cultura, desde que haja irrigação, ou umidade no solo. Porém em temperaturas baixas (menores que 21 °C) a cultura sofre diminuição na taxa de alongamento dos colmos e acúmulo de sacarose.

Uma ótima temperatura para o plantio da cana-de-açúcar é de 32° a 38° C e para o crescimento o ambiente deve apresentar temperaturas entre 22° a 30°C. Para a maturação e colheita, é necessário que ocorra a redução de temperatura para a faixa de 10° a 20°C, como na região Centro-Sul ou a redução pluviométrica como na região Norte-Nordeste, pois há uma diminuição na taxa de crescimento e acúmulo de sacarose (BARBIERE; VILLA NOVA, 1977).

Um fator importante para o cultivo da cana-de-açúcar é a luminosidade, pois sendo os açúcares resultantes da fotossíntese, a presença da luz se faz necessária para a completa realização do processo. Ela é importante também porque atua no processo de maturação através da translocação dos hidratos de carbono das folhas para

o colmo. (BARBIERI; VILLA NOVA, 1977; DOOREMBOS; KASSAN, 1979; MAGALHÃES, 1987).

A disponibilidade de água para a planta é um fator causador de variabilidade, ano a ano, da sua produtividade. Entretanto, em função das variações locais de clima e de variedades, é difícil estabelecer uma relação entre produção e consumo de água. Scardua e Rosenfeld (1987) afirmam que esse consumo varia também em função do estágio fenológico, do ciclo da cultura (cana planta ou cana soca), das condições climáticas, da água disponível no solo, dentre outros.

Desta forma, existem muitas variedades de cana que são melhoradas para se adaptarem a diversos tipos de clima e solos, e o correto manejo desta cultura começa pela escolha certa das variedades a serem plantadas.

#### **4.2.1 Plantio da cana-de-açúcar**

Segundo Ripoli e Ripoli (2004) o plantio da cana-de-açúcar envolve três etapas: A primeira etapa é a colheita das mudas, a segunda é a distribuição das mudas e a última etapa é a cobertura das mesmas. Segundo estes autores, o sistema de plantio pode ser manual, semi-mecanizado ou mecanizado.

Na região Centro-Sul do Brasil, o plantio da cana-de-açúcar pode ser feito em duas épocas: de janeiro a março, sendo chamada de “cana de ano e meio” e de setembro a outubro, denominadas “cana de ano”. No nordeste do país o plantio da cana ocorre entre os meses de junho a setembro para ser colhida o mais rápido possível, ou seja, entre 12 a 14 meses. (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

Para Camara (1998) na “cana de ano” a produtividade do primeiro corte varia entre 80 t.ha<sup>-1</sup> a 110 t.ha<sup>-1</sup> e este tipo de plantio é empregado em apenas 20% da área plantada no Brasil, sendo indicada em casos de necessidade urgente de matéria prima, por recente instalação ou ampliação do setor industrial ou por comprometimento de safra devido à ocorrência de adversidade climática. Plantios efetuados nessa época propiciam menor produtividade agrícola e expõem a lavoura à maior incidência de ervas daninhas, pragas, assoreamento dos sulcos e retardam a próxima colheita.

O plantio da cana de "ano e meio" é o mais recomendado tecnicamente. Além de não apresentar os inconvenientes da outra época, permite um melhor aproveitamento do terreno com plantio de outras culturas. Em regiões quentes,

como o oeste do Estado de São Paulo, essa época pode ser estendida para os meses subsequentes, desde que haja umidade suficiente (CASTRO, 1999).

As áreas de plantio da cana-de-açúcar são divididas em talhões, zonas e setores. O espaçamento entre os sulcos de plantio é feito de acordo com o tipo de sistema de colheita que será realizado. Em colheita mecanizada sem queima prévia, o espaçamento médio de plantio é de 1,40 m, sua profundidade de 20 a 25 cm e a largura é proporcionada pela abertura das asas do sulcador num ângulo de 45°, com pequenas variações para mais ou para menos, dependendo da textura do solo (CASTRO, 1999).

Assim, no Brasil o plantio da cana-de-açúcar é realizado em épocas distintas para algumas regiões devido às diferentes épocas de chuvas e influência da temperatura. Na região Centro-Sul, o plantio da cana inicia-se em fevereiro devido às chuvas de verão e termina em abril, sendo que para novos plantios é comum estendê-lo até o mês de maio. Na região Nordeste o plantio vai de junho a setembro (FERNANDES, 1984). De cada plantio, a cana pode ser colhida até cinco vezes, mas a cada ciclo devem ser feitos investimentos significativos para manter a produtividade (UNICA, 2006).

#### **4.2.2 Colheita da cana-de-açúcar**

A colheita da cana-de-açúcar inicia-se em maio e em algumas unidades sucroalcooleiras em abril, prolongando-se até novembro, período em que a planta atinge o ponto de maturação, devendo, sempre que possível, antecipar o fim de safra, por ser um período bastante chuvoso, que dificulta o transporte da matéria prima e faz cair o rendimento industrial (JUNHO, 2003).

A colheita pode ser feita de duas formas: colheita com queima prévia e colheita sem queima prévia. Apesar das possíveis consequências socioeconômicas decorrentes da mecanização nas regiões canavieiras, vários aspectos favoráveis ao corte de cana-de-açúcar sem queima prévia têm sido abordados (FURLANI NETO et al., 1997; SPAROVEK, 1997). Segundo estes autores, além de evitar as emissões dos gases responsáveis pelo efeito estufa, a prática de colheita de cana crua aumenta a quantidade de cobertura vegetal do solo nas soqueiras, diminuindo a erosão e aumentando a infiltração de água; acarreta melhoria nas qualidades tecnológicas (com diminuição das impurezas minerais), apesar do menor rendimento de corte das máquinas e maior quantidade de impurezas vegetais.

Conforme Delgado (1985), a partir de 1950 ocorreu o início da queima da cana-de-açúcar para facilitar o seu corte devido à escassez da mão de obra e as grandes unidades produtoras de açúcar. A substituição da despalha manual pela queima aumentou consideravelmente a produtividade do trabalho, ou seja, o cortador que cortava por dia de 1 a 2 toneladas, passou a cortar entre 4 a 6 toneladas por dia aumentando também a renda do trabalhador. A partir da década de 60, intensificou-se a queima prévia da cana, o corte manual, o carregamento mecânico da cana inteira e o transporte rodoviário.

Delgado (1985) e Bassinelo et al. (s.d.) citaram alguns fatores positivos e negativos na queima da cana-de-açúcar. Dentre os fatores positivos destacam-se: tanto para o corte manual como o mecanizado, a queima torna a operação mais fácil e mais barata; facilidades nas operações do solo, cultivo das soqueiras, maior teor de cinzas no solo, eliminação de broca, cigarrinhas e de outras pragas na cana-de-açúcar. E nos fatores negativos: a cana queimada traz consigo maior quantidade de matéria estranha, exigindo consumo elevado de água para a sua limpeza; se a cana for industrializada após 48 horas da queima, ocorre dificuldade de clarificação do caldo, na purificação, aumento de teores de brix, de sacarose, de fibra, acidez do caldo e da taxa de microorganismos; a queima causa perdas da ordem de 30% de matéria bruta, tornando evidente que, esta matéria bruta poderia ser utilizada para a produção de biogás ou produção de energia de biomassa.

Para Ripoli e Paranhos (1987) a razão principal da queima da cana-de-açúcar é a limpeza parcial do canavial, visando facilitar a operação de corte (manual ou mecânico) e dependendo das condições climáticas, tal procedimento pode reduzir entre 60% a 90% a matéria estranha vegetal que acompanha a cana-de-açúcar colhida. Porém, em relação a sua qualidade, as condições desejáveis são canas cortadas maduras, sem queima prévia, limpa e processada o mais rápido possível. E o problema ambiental causados pela queima da cana-de-açúcar tem levado países e regiões produtoras a proibirem as queimadas e forçarem o desenvolvimento de novos equipamentos e métodos de colheita.

Ripoli (1988) considera que a queima prévia dos canaviais é consagrada em função dos reflexos econômicos imediatos que oferece, porém, esclarece vários inconvenientes dessa prática, tais como: risco de descontrole, podendo provocar incêndio em outras áreas agrícolas ou matas, dificuldade de implantação de controle

biológico de pragas, danos às redes de transmissão de energia elétrica, perda de sacarose por exsudação dos colmos e desperdício de cerca de 10 t.ha<sup>-1</sup> de massa vegetal que poderia ser incorporada ao solo melhorando suas propriedades físico-químicas ou aproveitada como fonte de energia na agroindústria.

Com o avanço tecnológico, grande parte da colheita de cana-de-açúcar será feita através da colheita mecânica. Segundo Ustulin e Severo (2001) a colheita mecanizada não é só economicamente interessante por permitir padronização, pré-processamento da matéria prima e maior segurança no processo produtivo, mas, também por melhorar o controle das atividades de corte e sua compatibilização com o ritmo da indústria, reduzindo os problemas ambientais causados pela queimada e devido à instabilidade da mão-de-obra. Enquanto um trabalhador braçal colhe, em média, 6 t.dia<sup>-1</sup>, a máquina pode atingir até 600 t.dia<sup>-1</sup>.

#### **4.3 Poluições causadas pela queima dos canaviais**

Segundo IPCC (1995) os resíduos de cana-de-açúcar representam 11% da produção mundial de resíduos agrícolas, cuja queima produz substancial liberação de CO<sub>2</sub>, que não é considerada como uma emissão líquida, pois através da fotossíntese, a biomassa queimada é reposta no ciclo seguinte da cultura. Porém, durante o processo de combustão, outros gases, além do CO<sub>2</sub>, são produzidos. As taxas de emissão desses gases dependem do tipo de biomassa e das condições da queima. Os gases N<sub>2</sub>O e NO<sub>2</sub> são gerados na fase de combustão com chama, e os gases CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> são formados sob condições de queima com predomínio de fumaça. A figura 3 mostra as chamas e fumaças geradas na queima da cana-de-açúcar.





**Figura 3:** Queima da cana-de-açúcar para a colheita, causando poluição ambiental. (fonte: RIPOLI, 2002)

O aquecimento global proveniente do aumento da temperatura ao redor de todo o planeta em virtude das ações antrópicas desarmônicas com o ambiente é um dos assuntos mais discutidos desde o início da década de 90. A mudança climática esteve por muito tempo vinculada a ciclos graduais e lentos de cinquenta a cem anos, mas cada vez mais evidências atribuem as características aceleradas do fenômeno à liberação na atmosfera dos chamados gases causadores do efeito estufa. Este fenômeno é proveniente, principalmente, do excesso de  $\text{CO}_2$  liberado na atmosfera, decorrente da crescente queima de combustíveis fósseis, da destruição das florestas e adoção de práticas de queima de biomassa (cana-de-açúcar e algodão herbáceo, entre outros). A emissão excessiva dos gases estufa na atmosfera leva à formação de uma camada gasosa que embora permita a passagem dos raios ultravioletas do Sol, impede a irradiação do calor gerada pela luz solar de volta à atmosfera, fenômeno esse que está transformando a Terra em uma grande “estufa”, sendo a principal consequência desse fato o aquecimento global. Dentre os gases de efeito estufa, destaca-se: vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), ozônio ( $\text{O}_3$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e clorofluorcarbonetos (CFC), sendo os ecossistemas terrestres as principais fontes naturais de liberação, incluindo solos, várzeas, erupções vulcânicas e outros (LIMA et al, 1999). Devido a estes fatos, a queimada da cana na pré-colheita tem sido objeto de vários estudos.

Gonçalves (2002) relatou que a queimada da cana-de-açúcar por ter implicações ecológicas, econômicas e sanitárias, seu emprego vem sendo proibido e dado origem a processos jurídicos que visaram coibir esta prática. O emprego do fogo na colheita tem ação destruidora na fauna e na flora, além de poluir o ambiente liberando para

a atmosfera gases primários, também aumenta a temperatura e diminui a umidade no solo levando à maior compactação e perda de porosidade. Propicia, ainda, a polimerização das substâncias húmicas do solo e causa aumento na perda de nutrientes, seja para a atmosfera, através da combustão, ou para a água por posterior lavagem e lixiviação.

Segundo Riploli e Ripoli (2004) a queimada, inegavelmente causa impactos ambientais. Porém, o mais grave é o grau deste impacto, ou seja, o nível de degradação ao meio ambiente. No caso da queima da cana-de-açúcar, o fator agravante é a enorme quantidade de gases de alto potencial poluente liberada nas camadas mais baixa da troposfera, cujas concentrações ultrapassam em centenas e até milhares de vezes os valores ideais aos padrões de qualidade do ar.

Zancul (1998) sintetiza os resultados de vários estudos que apontam os efeitos adversos da queimada da cana-de-açúcar para o meio ambiente das regiões produtoras e para a qualidade de vida de sua população: sujeira provocada pelo carvãozinho (fuligem produzida na queima) e conseqüente aumento no consumo de água para limpeza; aumento do número de acidentes em rodovias em função da redução de visibilidade causada pela fumaça; problemas respiratórios, principalmente em crianças e idosos; eventuais interrupções no fornecimento de energia elétrica quando são realizadas queimadas muito próximas às linhas de transmissão; morte de animais silvestres, pássaros, insetos, que, por exemplo, combatem a broca da cana-de-açúcar.

Franco (1992) salienta que as doenças respiratórias são uma das principais conseqüências negativas da queima da cana. A coincidência entre o período de safra da cana-de-açúcar com a época de seca e inverno, naturalmente mais propensa ao surgimento de doenças no sistema respiratório, torna difícil identificar precisamente o impacto das queimadas sobre a saúde pública. De acordo com autor, não há dúvidas de que os efeitos existem, podendo ser inferidos, por exemplo, pelo aumento na incidência de doenças desse tipo nos moradores de regiões próximas aos locais de queima. Portanto, as queimadas certamente provocam uma perda de bem-estar e aumento dos gastos com o sistema de saúde.

Com a implantação da legislação vigente que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar, as indústrias estão em busca da adequação de sua produção, adotando novas formas de colheita que não utilizem o fogo no processo do corte. A mecanização é o método mais disseminado, mesmo não sendo aconselhável para áreas com declividade superior a 15%. (RIPOLI; RIPOLI, 2004)

#### 4.4 Resíduos provenientes da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia

No item anterior foi abordada a problemática decorrente da queima dos canaviais antecedendo a colheita, que é prática adotada nas diversas regiões canavieiras do Brasil e do mundo, com o objetivo de facilitar o corte e diminuir os acidentes de trabalho dos cortadores de cana-de-açúcar. Para finalizar tais problemas, a colheita da cana-de-açúcar com queima prévia terá que reduzir gradativamente até chegar ao fim, havendo, com isso, aumento da colheita da cana-de-açúcar mecanicamente e sem queima prévia (WOOD, 1991; TRIVELIN et al., 1997; RIPOLI, 2004).

Nesse novo sistema de colheita de cana, as folhas secas, os ponteiros, partes do colmo e as folhas verdes são lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura morta denominada palhiço, conforme mostra a figura 4. Esta camada de material vegetal depositada no solo aumenta a infiltração de água no solo, diminui a erosão e a evaporação, melhora a estrutura do solo e aumenta a sua capacidade de troca de cations. É, também, fonte de nutrientes para a macro e a microflora do solo e para a própria cultura da cana-de-açúcar (WOOD, 1991; CEDDIA et al., 1996; PINHEIRO et al., 1996).

Mas, para o Brasil, que é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, estima-se um grande montante de toneladas de palhiços por ano. No estado de São Paulo, que possui grande concentração dessa cultura, a produção do palhiço ocorre em larga escala (GONÇALVES; VEIGA FILHO, 1998; RIPOLI, 2004). Portanto, os problemas da permanência deste resíduo no solo têm sido amplamente estudados.

Velini e Negrisolo (2000) relatam que a camada de palhiço depositada sobre o solo pode ser superior a  $20 \text{ t.ha}^{-1}$  e Abramo Filho et al (1993) observaram que, em um hectare de cana-de-açúcar, com produção média  $100 \text{ t.ha}^{-1}$  de colmos, resulta cerca  $15$  a  $30 \text{ t.ha}^{-1}$  de palhiço.



**Figura 4:** Resíduos da colheita da cana crua depositada no solo (fonte: RIPOLI, 2002).

Segundo Furlani Neto et al. (1997) a deposição e manutenção de palhada sobre a superfície do solo, mesmo contribuindo com a sua conservação, podem causar problemas relacionados ao manejo da cultura. Alguns desses problemas podem ser citados: dificuldades durante as operações de cultivo e adubação da soca (AUDE et al., 1993), retardamento da brotação inicial da soqueira devido aos efeitos de sombreamento, da barreira física e da diminuição da temperatura do solo (CAMPOS, MARCONATO, 1994) e dificuldade de execução de controle seletivo de plantas daninhas e aumento das populações de pragas que se abrigam e se multiplicam sob a palhada (MACEDO et al., 2003). Além disso, o grande volume de palha sobre a cana soca dificulta a sua emergência, causando falhas na rebrota, especialmente nas variedades melhoradas que foram desenvolvidas num sistema de colheita com queima, que favorecia a maior taxa de emergência da cana soca (VASCONCELOS, 2002).

Orlando Filho et. al. (1994) mostraram que a presença do colchão de palha deixado no solo após a colheita de cana crua é responsável pela redução de 52% da produtividade agrícola em relação à queima, para a variedade SP71-6163. Grande quantidade destes resíduos terá que ser retirado da lavoura e utilizado para viabilizar economicamente a produção desta cultura.

Segundo Arévalo e Bertoncini (1999) a palhada da cana-de-açúcar depositada no solo depois da colheita sem queima prévia prejudica a brotação da cana. Em locais de baixada, o excesso de umidade acumulada no terreno prejudica a brotação e o crescimento da cana e há necessidade de doses adicionais de nitrogênio.

Ávarez e Castro (1999) destacam diversos pontos negativos no depósito total do palhicho da cana-de-açúcar sobre o solo, dos quais citam-se: o aumento de pragas como a cigarrinha da raiz e broca, as incidências de doenças como as podridões das

soqueiras, as irregularidades da brotação da cana-de-açúcar, a queda de produtividade em variedades suscetíveis ao palhiço, o difícil manuseio deste resíduo em áreas não mecanizáveis e a necessidade obrigatória de colhedora pela dificuldade de se utilizar corte manual em canaviais sem queima. Em áreas cultivadas com cana-de-açúcar colhida sem a queima e ficando o solo coberto pelo palhiço, Almeida Filho (1995) verificou o aumento do ataque da broca da cana (*Diatraea saccharalis*)

Lima et al (1999) mostram a biomassa oxidada, determinada em experimento de campo pela Embrapa Meio Ambiente, para a variedade SP 71-6163, no quarto ciclo, com material coletado antes e após a queima ocorrida em abril de 1997, em talhões da Usina Santa Elisa, no município de Sertãozinho, estado de São Paulo. Os dados obtidos nesse experimento são apresentados no quadro 1, comparativamente às estimativas de Macedo (1997).

**Quadro 1:** Produção de biomassa seca pela variedade SP 71-6163 (Fonte: Lima et. al 1999).

Resíduos	Macedo (1997) Biomassa seca (t.ha <sup>-1</sup> )	Embrapa Meio Ambiente Biomassa seca (t.ha <sup>-1</sup> )
Folhas secas	10,1	7,5
Folhas verdes e pontas	3,8	4,9
Total	13,9	12,4

Beeharry (2001) avaliou a produção de resíduos e energia da biomassa da cana-de-açúcar e concluiu que a produção de energia pode ter um aumento de até 50%, com acréscimos do palhiço da cana-de-açúcar no sistema de produção de energia.

Essa biomassa, portanto, que não pode nem ser queimada e nem deixada de forma total no solo, deve ser aproveitada. Sua retirada de forma manual é economicamente inviável para os moldes atuais e também pelos preços do açúcar e do álcool, que são incompatíveis com os custos adicionais da retirada desse material (MAGRO, 1996).

#### 4.5 Aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar

Segundo Grassi e Palz (1994) a fonte mais abundante e barata de energia renovável é a biomassa, que pode produzir grandes quantidades de energia através de combustível gasoso, líquido e eletricidade.

Para Doat (1977) a energia contida nesta biomassa pode ser avaliada pelo poder calorífico que é a quantidade de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa desse corpo ( $\text{cal.g}^{-1}$  ou  $\text{kcal.kg}^{-1}$ ). O poder calorífico pode ser representado de três formas distintas: poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU). Sendo dito poder calorífico superior quando a combustão se efetua a volume constante e a água formada durante a combustão é condensada e poder calorífico inferior quando a combustão é efetuada a pressão constante e a água durante a combustão não é condensada.

Segundo Brito e Barrichelo (1982) a diferença entre o PCS e o PCI ocorre em função de se considerar ou não o calor liberado pela condensação de água de constituição da biomassa.

Doat (1977) desenvolveu uma fórmula que relaciona o PCS e PCI, que é regida pela quantidade de hidrogênio contido no combustível, descontando o calor de vaporização da água formada no processo, ou seja:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 600 \cdot \left( \frac{9\text{H}}{100} \right) \dots\dots\dots(1)$$

onde:

- PCI ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ) = poder calorífico inferior com base em peso seco;
- PCS ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ ) = poder calorífico superior, obtido em bombas calorimétricas;
- H (%) = teor do elemento hidrogênio no material;
- 600 (kcal) = valor médio de energia absorvida por kg de água, para se atingir a temperatura de evaporação;
- 9 = múltiplo do peso do hidrogênio, contido no material que fornece o peso da água formada durante a combustão.

Ripoli e Ripoli (2004) afirmam que quando o objetivo da biomassa é a produção de eletricidade por cogeração, é necessário saber o valor do poder calorífico útil (PCU) da matéria prima, pois ele leva em conta o seu teor de umidade o qual será queimado.

Doat (1977) também desenvolveu uma fórmula para o cálculo do PCU:

$$PCU = PCI \left[ \frac{(100 - U)}{100} \right] - 6H \dots\dots\dots(2)$$

onde:

- PCU (kcal.kg<sup>-1</sup>) = poder calorífico útil à umidade U da biomassa;
- PCI (kcal.kg<sup>-1</sup>) = poder calorífico inferior com base em peso seco;
- U (%) = teor de umidade da biomassa com base em peso úmido;
- 6 = fator de conservação referente à energia para evaporação da água de formação;
- H (%) = teor do elemento hidrogênio no material.

Segundo Lopez (1987), a porcentagem de palhiço varia em função da variedade de cana-de-açúcar plantada e das condições em que se desenvolveu o cultivo. Na maioria dos experimentos realizados por este autor, a média de palhiço produzido foi de 30% do total da planta, sendo a menor porcentagem encontrada de 15%. A umidade dessa biomassa, quando deixada ao ar livre, cai, no período de uma semana, para 30%, chegando, em certos casos, a 20%.

Sartori (2001) determinou o teor de umidade, o PCI, o PCU e PCS das palhas, folhas verdes e ponteiros de cinco variedades de cana-de-açúcar em quatro colheitas. O quadro 2 mostra a média do teor de umidade, do poder calorífico superior, poder calorífico inferior e poder calorífico útil dos componentes do palhiço nas quatro colheitas de cinco variedades de cana-de-açúcar.

**Quadro 2:** Média do teor de umidade (U(%)), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e poder calorífico superior (PCS) dos componentes do palhiço de cinco variedades de cana-de-açúcar para quatro colheitas (fonte: Sartori, 2001).

Componentes	Variedades	U(%)	PCI (kJ.kg <sup>-1</sup> )	PCU (kJ.kg <sup>-1</sup> )	PCS (kJ.kg <sup>-1</sup> )
<b>Folhas verdes</b>	RB72454	60,80	17808,95	15169,57	19087,55
	RB835486	59,90	17819,15	15176,32	19018,75
	RB855113	62,03	17598,60	14984,40	18961,22
	RB855536	61,83	17568,10	15035,52	18895,47
	SP791011	61,14	17576,10	14964,82	18859,60
<b>Palhas</b>	RB72454	13,70	17633,02	15088,45	18939,50
	RB835486	14,70	17540,15	14983,65	18872,10
	RB855113	14,50	17730,20	15248,12	19076,87
	RB855536	14,12	17603,47	15035,52	18938,05
	SP791011	18,07	17475,00	14876,90	18784,30
<b>Ponteiros</b>	RB72454	77,34	16683,65	14188,45	18087,00
	RB835486	75,85	16665,10	14172,30	18016,87
	RB855113	78,13	16373,47	13918,52	17785,97
	RB855536	76,47	16605,70	14120,62	17973,02
	SP791011	76,95	16579,50	14097,82	17903,40

Zulauf et al (1985) pesquisaram a produção do palhiço da cana-de-açúcar através de análises sobre o potencial energético destes resíduos e estimaram um desperdício de até 87720 Gcal.ano<sup>-1</sup> para a safra de 84/85, o que equivale à importação de 342000 barris diários de petróleo durante 162 dias, o qual permitiria naquela época abastecer o país durante 63 dias com uma economia de aproximadamente US\$ 1,465x10<sup>9</sup>.

Ripoli e Ripoli (2004) afirmam que quando os canaviais são queimados para posterior colheita, ocorre um grande desperdício de energia, pois, segundo trabalhos desenvolvidos, dependendo de condições varietais, edafo-climáticas e idade do canavial, um hectare de cana pode conter uma quantidade de resíduos agrícolas que varia entre 9 a 32 toneladas (base de peso úmido). E uma tonelada destes resíduos pode fornecer a mesma energia gerada por 1,2 a 3 barris de petróleo. Com a prática da queimada da cana-de-açúcar na pré-colheita esta energia é desperdiçada.

Saffioti (1985) salienta que para se ter uma visão da energia desperdiçada na queima dos canaviais basta compará-la aos equivalentes de outras fontes de energia. Estas comparações demonstram que o desperdício de energia nas queimadas anuais corresponde a 15,5 bilhões de litros de etanol. Este valor é, aproximadamente, 50%



superior à energia gerada pelo álcool produzido no Brasil em 1985. A energia liberada na queimada dos canaviais é equivalente à energia produzida por um conjunto de usinas produtoras de eletricidade com potencial de 8,8 milhões de kW.

Carvalho (2005) mostra que a cultura da cana-de-açúcar pode contribuir muito para a geração de eletricidade (quadro 3). Baseando-se nas safras de 2004 e 2005, e considerando o bagaço e palhiço, o potencial de geração de eletricidade pode chegar a 12 mil MW, sendo da ordem de 70 mil MW a potência de energia instalada no Brasil.

Sartori (1996) mostrou que, na produção de 1418,18 toneladas de cana, os resíduos gerados na colheita sem queima prévia têm aproximadamente 3347,2 MJ de energia calorífica, podendo gerar em média 17750 kWh de eletricidade.

Para Magro (1996) quando o sistema de colheita da cana crua estiver estabelecido, a cultura da cana-de-açúcar será considerada a cultura da integração social, uma das mais econômicas e ecológicas da atualidade e geradora de empregos. Com ela produzem-se alimentos, energia, polpa celulósica e sua exploração e industrialização apresentarão baixos níveis de poluição.

**Quadro 3:** Potencial de energia primária de uma tonelada de cana-de-açúcar (fonte: CTC, 2005; UNICA, 2005).

Potencial Energético	Energia (10 <sup>3</sup> kcal)	Toneladas Equivalente de Petróleo (TEP)
83 litros de álcool	550	0,050
280 kg de bagaço	630	0,058
280 kg de palhiço	630	0,060
<b>Total</b>	<b>1810</b>	<b>0,168</b>

Comprovada as vantagens de recuperação e utilização do potencial energético dessa biomassa, surge a necessidade da escolha e quantificação do material e realização de um balanço econômico de uma nova maneira de produção canavieira (RIPOLI; VILLANOVA, 1992).

#### 4.6 Sistemas de recolhimento do palhiço

Segundo Ripoli (2002) a coleta do palhiço da lavoura exige as seguintes operações: primeiro este resíduo é enleirado por máquina do tipo ancinho enleirador (figura 5) em seguida, é enfardado por uma máquina. Os fardos podem ser prismático (figura 6) ou cilíndricos (figura 7). Depois estes fardos são carregados por uma garra carregadora (figura 8) e carregados em caminhões para serem transportados até a usina.



**Figura 5:** Máquina utilizada para enleirar o palhiço (fonte: RIPOLI, 2002)



**Figura 6:** Fardo prismático do palhiço (Fonte: RIPOLI, 2002).



**Figura 7:** Fardo cilíndrico do palhiço (Fonte: RIPOLI, 2002).



**Figura 8:** Operação de carregamento do palhiço para o transporte até a usina (fonte: RIPOLI, 2002)

Ripoli (2002) descreve o custo de coleta, transporte e descarregamento do palhiço na usina para dois sistemas: integral da cana-de-açúcar (palhiço e colmos são recolhidos ao mesmo tempo) e o enfardamento do palhiço residual da colheita convencional. Confirmando que a colheita integral é o sistema de colheita do palhiço que apresenta menor custo para a coleta e o transporte deste resíduo.

Ripoli e Ripoli (2004) descrevem os sistemas de recolhimento do palhiço, custos destas operações e o desempenho operacional das máquinas e salienta a necessidade da produção de novos equipamentos para a coleta desta biomassa, de baixo custo na sua aquisição e que forneça uma matéria prima de maior qualidade.

A escolha da variedade de cana-de-açúcar pode ser mais uma opção para o aproveitamento do palhiço, pois, pode-se escolher variedades de cana-de-açúcar que derive palhiços com mínimo custo para enfardamento, carregamento e transporte até a usina e/ou que ofereça um balanço ótimo de energia em seu aproveitamento, levando-se em conta as necessidades da usina, possibilitando melhores resultados econômicos e maior ganho energético. A escolha das variedades de cana a serem plantadas pode ser auxiliada pelos métodos matemáticos de otimização (SARTORI, 2001; SARTORI; FLORENTINO, 2002; FLORENTINO; SARTORI, 2003; FLORENTINO, 2005).

Florentino (2005) apresentou três modelos de otimização: minimização do custo de coleta da biomassa residual da cana-de-açúcar, modelo de maximização do balanço de energia da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar e modelo multiobjetivo para minimização do custo de coleta e maximização do balanço de energia da biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar, com o propósito de encontrar

as variedades de cana-de-açúcar que produzam palhiços que minimizem o custo em sua coleta e transferência para a usina e maximizem o balanço de energia em seu aproveitamento. Para a aplicação dos modelos descritos, a autora fez um vasto levantamento de dados das variedades e de maquinários, conforme mostra os quadros 4 e 5. Estes dados são muito úteis para obtenções de estimativas e aplicação de modelos matemáticos.

**Quadro 4:** Estimativa do volume do palhiço em toneladas da variedade  $i$  ( $V_i$ ), produtividade de palhiço da variedade  $i$  ( $P_{Bi}$ ), poder calorífico útil do palhiço produzido pela variedade  $i$  ( $Ec_{Bi}$ ), produtividade de açúcar fermentescível (POL) da variedade  $i$  ( $A_i$ ), estimativa do volume do palhiço por unidade de área plantada da variedade  $i$  ( $Q_i$ ) e produtividade de fibra da variedade  $i$  ( $F_i$ ) (fonte: Florentino, 2005)

$i$	Variedade	$V_i$ $m^3.t^{-1}$	$P_{Bi}$ $t.ha^{-1}$	$Ec_{Bi}$ $Mj.t^{-1}$	$A_i$ $t.ha^{-1}$	$Q_i$ $m^3.ha^{-1}$	$F_i$ $t.ha^{-1}$
1	SP70-1284	4,74	13,37	9156,45	13,12	63,36	10,04
2	SP71-6163	8,72	23,57	8120	12,74	205,55	9,65
3	SP70-1143	7,05	22,14	8057,22	15,01	155,98	11,59
4	SP71-3146	10,15	27,42	8963,06	12,86	278,19	10,33
5	NA56-79	9,56	21,53	10231,42	12,84	205,77	9,28
6	RB72454	8,71	23,54	8392,47	15,26	205,03	11,73
7	RB855536	9,78	26,43	9259,22	17,05	258,46	12,51
8	SP79-1011	8,91	24,09	8277,68	15,80	214,72	10,33
9	RB855113	10,87	29,38	9611,14	17,54	319,38	10,91
10	RB 806043	12,32	33,3	8408,96	20,77	410,29	16,12
11	RB835486	9,08	20,96	8298,11	14,48	190,32	11,25

**Quadro 5:** Custos e consumo de combustível e energia dos maquinários utilizados para a coleta do palhiço e recomendações de teores de Pol e fibra da cana: custo para enleirar, compactar e carregar o palhiço ( $C_{ecc}$ ), consumo de combustível do caminhão usado no transporte do palhiço ( $C_o$ ), preço de um litro de combustível ( $P$ ), energia consumida pelas máquinas para enleirar e compactar uma tonelada de resíduo ( $E_{c_{EC}}$ ), energia consumida pela máquina para carregar o caminhão com uma tonelada do resíduo ( $E_{c_C}$ ), energia consumida pelo caminhão para o transporte do resíduo ( $E_{c_T}$ ), capacidade de carga do caminhão a ser usado no transporte do palhiço ( $V_c$ ), quantidade mínima recomendada de POL ( $\bar{P}$ ) e produção mínima e máxima recomendados para o teor de fibra ( $\bar{F}_I$  e  $\bar{F}_S$ ) (fonte: Florentino, 2005).

$C_{ecc}$	$C_o$	$P$	$E_{c_{EC}}$	$E_{c_C}$	$E_{c_T}$	$V_c$	$\bar{P}$	$\bar{F}_I$	$\bar{F}_S$
US\$.t <sup>-1</sup>	L.km <sup>-1</sup>	US\$.L <sup>-1</sup>	Mj.t <sup>-1</sup>	Mj.t <sup>-1</sup>	Mj.km <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>
7,03	0,125	0,85	7,56	57,54	5,25	54,57	14	11	15

A colheita da cana sem queima prévia sendo adotada pelas usinas que desejarem aproveitar o palhiço tenderá a apresentar custos operacionais menores do que os atuais, pois as futuras colhedoras de cana sem queima prévia, poderão apresentar valores de aquisição menores por exigência do mercado (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

#### 4.7 Otimização

A otimização é uma ciência aplicada. Seus conceitos e métodos são utilizados para concepção, planejamento e operação de sistemas de forma a atingir seus objetivos da melhor forma possível.

Em um problema de otimização tem-se uma função objetivo que pode ser linear ou não linear e um conjunto de restrições lineares ou não lineares, ambos relacionados às variáveis de decisão. O problema pode ser de minimização ou de maximização da função objetivo. A resposta para o problema, ou seja, a solução ótima, fornecerá o menor (ou maior) valor possível para a função objetivo para o qual o valor atribuído às variáveis não viole nenhuma restrição. Existem muitas classificações possíveis para os problemas de otimização, e algumas delas apresentam métodos exatos e eficientes de resolução. Outras levarão à necessidade de métodos não-exatos, chamados heurísticas,

uma vez que sua formulação e/ou resolução exatas levariam a uma complexidade intratável.

Assim, um problema de otimização é expresso da seguinte forma:

$$\text{Minimize } f(x) \text{ (ou Maximize } f(x)) \dots \dots \dots (3)$$

Sujeito a

$$g(x) \leq 0, (g(x) = 0 \text{ ou } g(x) \geq 0)$$

$$x \in \mathbb{R}^n$$

onde, a função  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  é chamada função objetivo e as funções  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$  são chamadas restrições e estas limitam o espaço de soluções do problema, chamadas de soluções factíveis (ou soluções viáveis), sendo  $x$  o vetor de variáveis de decisão. (CHARNES, 1952; BAZARAA, 1977; LUENBERGER, 1984; STEUER, 1989; PARDALOS; RESENDE, 2002, entre outros)

#### 4.7.1 A programação Linear

O Problema de Programação Linear (PPL) é um problema da forma (3) onde a função objetivo  $f$  é linear, definida como  $f(x) = c^T x$ , podendo ser maximizada ou minimizada. O sistema de inequações  $g(x) \leq 0$  é linear podendo também ser da forma:  $Ax - b = 0$  ou  $Ax - b \geq 0$ , conforme mostrado em (4) (CHARNES, 1952; BAZARAA, 1977; LUENBERGER, 1984; STEUER, 1989; PARDALOS; RESENDE, 2002, entre outros).

$$\text{Minimize (ou Maximize) } c^T x \dots \dots \dots (4)$$

Sujeito a

$$Ax = b \text{ (} Ax \geq b \text{ ou } Ax \leq b),$$

$$x \geq 0$$

A Programação linear desenvolveu-se no século XX para resolver problemas de logística. Uma contribuição decisiva para o desenvolvimento da programação linear veio das suas aplicações a problemas clássicos da Economia, destacando se, nesta área, o nome de T. C. Koopmans. Assim como Dantzig, também o Russo L. V. Kantorovich desenvolveu, em 1939, um algoritmo rudimentar para resolver

alguns problemas particulares de programação linear (LASDON, 1970; RAMALHETE; GUERREIRO; MAGALHÃES, 1984).

As técnicas utilizadas para determinar numericamente a solução ótima de um problema de programação linear (PPL) são baseadas em dois métodos: o método simplex (DANTZIG, 1949) e o método de pontos interiores (KARMAKAR, 1984).

O método simplex iniciado em 1947 por Dantzig e publicado em Dantzig (1949) é um procedimento algébrico e iterativo que fornece a solução exata de qualquer problema de programação linear em um número finito de iterações. É também capaz de indicar se o problema tem solução ilimitada, se não tem solução ou se possui infinitas soluções. Este algoritmo pode ser visto como um processo combinatório que busca encontrar as colunas da matriz de restrições que induzem a uma base e, portanto, uma solução básica ótima. Existe uma ampla literatura que mostra este método e suas variações, como exemplo cita-se: LUENBERGER, 1984; RAMALHETE; GUERREIRO; MAGALHÃES, 1984; BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 1990; HILLIER; LIEBERMAN, 2000; HUANG; YUANG; LEE, 2002; PARDALOS; RESENDE, 2002 entre outros.

O primeiro método de pontos interiores polinomial para programação linear foi desenvolvido por Karmarkar (1984) e é baseado em transformações projetivas e a grande vantagem deste é a sua natureza polinomial (ADLER, et. al., 1989).

Após alguma controvérsia sobre o desempenho do método, diversos trabalhos mostraram que variações deste método apresentavam desempenho computacional superior ao método simplex (ADLER, et al., 1989; OLIVEIRA; LYRA, 1991). Atualmente, os métodos primais-duais são considerados os mais eficientes (WRIGHT, 1996) e o desempenho destes métodos para problemas quadráticos convexos com variáveis separáveis é similar ao desempenho apresentado para problemas lineares (VANDERBEI, 1995).

Por sua vez, técnicas de pontos interiores têm sido estudadas e utilizadas em diversas áreas de aplicação. Em particular, têm sido sugeridas para a resolução de problemas de fluxo de potência (GRANVILLE, 1994), obtendo excelente desempenho tanto em termos de eficiência como de robustez (MOMOH et al., 1999; QUINTANA et al., 2000; MEHROTRA, 1992)

Desde o surgimento dos métodos de pontos interiores para programação linear, foram criados códigos computacionais baseados nessas idéias que se

apresentam como alternativas eficientes para problemas de grande porte como mostram as referências bibliográficas relacionadas ao assunto (ADLER, et al., 1989; GONDZIO, 1996; LUSTIG; MARSTEN; SHANNO, 1992; OLIVEIRA; LYRA, 1991; GONZAGA, 1989; OLIVEIRA, LIRA 2004, entre outros).

#### 4.7.2 Problemas de programação linear inteira

Segundo Thara (1975), a programação inteira iniciou-se no final da década de 40 e início da década de 50, com aplicações em pesquisas operacionais, mas com um caráter puramente matemático. Mas, somente em 1958, Gomory (1958) desenvolveu a primeira técnica para programação inteira finita para resolver problemas de programação linear inteira. Deste então, outros algoritmos têm sido desenvolvidos e melhorados para resolução desta classe de problemas.

Um problema de programação linear inteira (PPLI) é da forma:

Minimize (ou Maximize)  $c^t x$ .....(5)

Sujeito a

$Ax = b$

$x_i \geq 0, i \in N = \{1, 2, \dots, n\}$

$x_i$  inteira,  $i \in I \subseteq N$

onde:

$c^t \in R^n, A \in R^{m \times n}, b \in R^m, x \in R^n;$

$N$  é o conjunto de índices das variáveis do problema;

$I$  é o conjunto de índices das variáveis restritas a assumirem valores inteiros.

O objetivo pode ser de minimização ou maximização da função  $c^t x$  e as restrições definidas pela expressão  $Ax = b$ , podem incluir também as desigualdades:  $\leq$  e  $\geq$ . Dependendo das características do conjunto  $I$ , o problema (5) pode ser definido como: Problema de Programação Linear (PPL), quando  $I$  é um conjunto Vazio; Problema de Programação Linear Inteira (PPLI), quando  $I = N$ ; Problema de Programação Linear Inteira



Mista (PPLIM), quando  $I \subset N$  ou Problema de Programação Linear Inteira Binária, (PPLIB) quando as variáveis são restritas a assumirem os valores 0 ou 1.

Segundo Lachtermacher (2004) problemas de programação linear inteira são problemas de programação matemática em que uma ou mais variáveis de decisão devem assumir valores inteiros. Esses problemas podem apresentar dois tipos básicos: Programação Linear Inteira Pura: todas as variáveis de decisão são do tipo inteiro; Programação Linear Inteira Mista: apenas uma parte das variáveis são do tipo inteiro, enquanto outras são do tipo real.

Segundo Florentino (2005), existem vários métodos para a resolução de problemas de programação inteira tais como: algoritmo de Gomory, algoritmo *Branch-and-Bound*, Geração de Colunas, Métodos de Pontos Interiores, entre outros. Em geral, estes métodos estão dentro de uma das três classificações: Métodos de Planos de Corte, Métodos Enumerativos e Algoritmos Iterativos e Heurísticos (aproximativos). Em problemas de grande porte e outros de médio porte, estes métodos podem apresentar um tempo computacional muito longo, o que em geral é indesejável. Para amenizar esses problemas, muitas vezes são usadas estratégias na formulação do modelo ou nos algoritmos de resolução do problema para melhorar o desempenho computacional. Assim, surgiram os algoritmos híbridos e as relaxações, como por exemplo, o método de *Branch-and-Cut*, a Relaxação Lagrangeana, dentre outros. Sherali e Driscoll (2000) apresentaram uma excelente revisão bibliográfica da programação linear inteira, mostrando a evolução de todos os métodos desta área até o ano 2000.

O algoritmo de partição e avaliação sucessivas (*Branch and Bound*), apresentado por Land e Doig (1960), é o algoritmo que está na base da maioria dos códigos de computador relativos à programação linear inteira, sendo aplicável em problemas que assumem variáveis inteiras, mistas ou binárias. Problemas de programação linear inteira binária constituem uma classe particular de problemas de programação linear inteira e, portanto, podem ser resolvidos por algoritmos como o de Gomory e o de *Branch and Bound*, além de um algoritmo desenvolvido por Balas (1965) conhecido por Enumeração Implícita (GUERREIRO; MAGALHAES; RAMALHETE, 1985).

A idéia geral do algoritmo de *Branch and Bound* é o de dividir o conjunto de soluções viáveis em subconjuntos sem intersecções entre si, calculando limites superiores e inferiores para o valor ótimo da função objetivo em cada subconjunto e

eliminando alguns subconjuntos de acordo com regras pré-estabelecidas (LACHTERMACHER, 2004).

Muitos problemas podem ser resolvidos com o auxílio da programação inteira. Como por exemplo, problemas de planejamento da produção de uma empresa (indústria, fazenda, comércio, etc.) envolvendo dimensionamento de lotes, seqüenciamento de itens, seqüenciamento de tarefas, corte de estoques, etc. Problemas de rotas, localização, cobertura, entre outros, são problemas clássicos desta área (FLORENTINO, 1990; PERIN; RANGEL, 1989; GUERREIRO; MAGALHAES; RAMALHETE, 1985; DARBY-DOWMAN; RANGEL 1998; GRAMANI et. al., 2001; RANGEL; FERREIRA, 2003; VERA et al., 2003; CAVALI; RANGEL, 2004; e muitos outros).

Na literatura, podem-se encontrar vários trabalhos que mostram melhorias no método de *Branch-and-Bound* para melhorar e agilizar as soluções computacionais (GONDRAN; MINOUX , 1979; BALAS et al., 1996; DIETRICH; ESCUDERO, 1992; CERIA et. al., 1998; MITCHEL, 2002; PARDALOS; RESENDE, 2002; BASESCU; MITCHEL, 2005, entre outros).

## **5 MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1 Considerações iniciais**

Com a redução gradativa das queimadas nos canaviais, o palhiço derivado da colheita de cana-de-açúcar crua, tornou-se foco para os pesquisadores e produtores. As vantagens no seu recolhimento, recuperação e aproveitamento têm mobilizado pesquisadores de universidades, gerentes e diretores de usinas.

Além do potencial energético desta biomassa, podem-se destacar como vantagens no aproveitamento do palhiço, as questões ambientais, a criação de empregos e a projeção de vida limitada para os recursos energéticos de fontes naturais. Mas, a grande dificuldade ainda encontrada para aproveitamento destes resíduos esta na viabilidade econômica e no consumo energético desta prática.

Um dos itens a ser considerado na viabilidade do aproveitamento do palhiço é a escolha das variedades para o plantio da cultura de cana-de-açúcar, que pode ser auxiliada por modelos matemáticos. Assim, os modelos matemáticos apresentados aqui, propõem escolher variedades de cana-de-açúcar a serem plantadas nas áreas agrícolas da usina que derive palhiços de forma a otimizar o balanço de energia e o custo no aproveitamento destes resíduos para a produção de energia.

Para a formulação e resolução destes modelos matemáticos são necessários o conhecimento da produção agrícola e industrial da cana-de-açúcar, custo de coleta e transporte, balanço de energia no aproveitamento do palhiço; modelagem de

problemas de otimização e técnicas de resolução de problemas de programação inteira binária. Assuntos que serão tratados a seguir.

## 5.2 Modelagem de problemas de programação linear inteira binária (PPLIB)

Para modelagem de um problema de programação linear inteira binária deve-se:

- Identificar as variáveis manipuláveis do problema, chamadas variáveis de decisão:  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Todas ou parte destas variáveis devem assumir valores inteiros;
- Identificar o objetivo a ser alcançado. Este objetivo deve ser modelado como uma função linear das variáveis de decisão:  $c^t x$ , que deve ser maximizada ou minimizada;
- Obter as restrições do sistema. As quais serão modeladas por equações lineares das variáveis de decisão:  $Ax = b$  ( $Ax \leq b$  ou  $Ax \geq b$ ).

Assim, o modelo matemático de um PPLIB será apresentado na seguinte forma:

$$\begin{aligned} ZP_1 &= \text{minimizar } c^t x \\ &\text{sujeito a} \\ &Ax = b \\ &x_i \in \{0,1\} \quad i \in I \subset N = \{1, 2, \dots, n\} \end{aligned} \dots\dots\dots(6)$$

onde:

$$c^t \in \mathbb{R}^n, x \in \mathbb{R}^n, A \in \mathbb{R}^{m \times n}, b \in \mathbb{R}^m;$$

$N$  é o conjunto de índices das variáveis do problema (6);

$I$  é o conjunto de índices das variáveis restritas a assumirem valores inteiros;

o espaço de definição do problema (6) é considerado limitado.

## 5.3 Método para resolução de um PPLIB

O método sugerido para resolução do PPLIB é o *Branch-and-Bound*. Para a descrição desse algoritmo, considere o seguinte PPL, obtido pela relaxação da integralidade do problema (6), que será denominado problema (7):

$$\begin{aligned} ZP_C &= \text{minimizar } c^t x \\ \text{sujeito a} & \\ Ax &= b \quad \dots\dots\dots(7) \\ 0 \leq x_i &\leq 1 \quad i \in N = \{1, 2, \dots, n\} \end{aligned}$$

onde:

$$c^t \in R^n, x \in R^n, A \in R^{m \times n}, b \in R^m;$$

$N$  é o conjunto de índices das variáveis do problema.

O algoritmo *Branch-and-Bound* baseia-se nos seguintes passos:

**Passo 1: Resolva o problema contínuo:**

Resolva o problema contínuo (7). Vá para o passo 2.

**Passo 2: Avalie o problema (7):**

Teste a factibilidade da solução de (7) para o problema (6).

Seja  $x^*$  a solução ótima de (7). Se  $x_i^*$  assumir os valores 0 ou 1 para todo  $i \in I$ , então  $x^*$  é também solução ótima para (6) e o problema está resolvido,  $Z^* = ZP_1(x^*)$ , vá para o fim (passo 8). Caso contrário faça  $Z^* = +\infty$ , vá para o passo 3.

**Passo 3: Inicialize a lista de subproblemas a serem avaliados:**

No caso da solução de (7),  $x^*$ , não ser factível para o problema (6), tome um índice  $j \in I$ , cuja variável  $x_j^*$  tenha valor fracional e crie os subproblemas (7a<sub>1</sub>) e (7a<sub>2</sub>), acrescentando respectivamente as restrições ( $x_j = \text{int}(x_j^*)$ ) e ( $x_j = \text{int}(x_j^*) + 1$ ) no problema (7), onde  $\text{int}(x_j^*)$  é a parte inteira de  $x_j^*$ . Têm-se agora dois problemas a serem avaliados: (7a<sub>1</sub>) e (7a<sub>2</sub>). Diz-se, portanto, que o problema (7) foi ramificado (ou separado em dois subproblemas). Vá para o passo 4.

**Passo 4: Escolha um dos subproblemas para avaliar:**

Caso exista subproblema na lista de subproblemas a serem avaliados, escolha um e vá para o passo 5. Caso contrário, vá para o fim (passo 8).

**Passo 5: Avalie o subproblema escolhido:**

Suponha que foi escolhido o  $(7a_1)$ , para avaliá-lo faça:

Resolva o problema contínuo  $(7a_1)$ .

Se sua solução  $(x^{*1})$  for factível para (7) e infactível para (6) e o valor  $ZP_{C1}(x^{*1})$  for menor do que  $Z^*$ , vá para o passo 7. Caso contrário, vá para o passo 6.

**Passo 6: Faça a sondagem:**

Diz-se que um subproblema é sondado quando a avaliação detectar que sua ramificação não é promissora, não há possibilidade de encontrar soluções melhores para (6). Então o nó é sondado (não é mais separado).

Um subproblema é sondado se ocorrer um dos seguintes casos:

- A solução do problema que está sendo avaliado é infactível para (7).
- A solução do problema que está sendo avaliado é factível para (7) e infactível para (6) e o valor ótimo da função objetivo do subproblema que está sendo avaliado é maior ou igual a  $Z^*$ .
- A solução do problema que está sendo avaliado é factível para (6) (deve-se atualizar  $Z^*$  quando o valor ótimo da função objetivo do subproblema que está sendo avaliado for menor do que  $Z^*$ ).

Vá para o passo 4.

**Passo 7: Separe o subproblema em dois e os coloque na lista de subproblemas a serem avaliados:**

Separe o subproblema  $(7a_1)$  em dois outros  $(7a_{11})$  e  $(7a_{12})$ , acrescentando as restrições  $(x_j = \text{int}(x^{*1}_j))$  e  $(x_j = \text{int}(x^{*1}_j)+1)$  no subproblema  $(7a_1)$ , onde  $x^{*1}_j$  tem valor fracional. Têm-se agora os subproblemas  $(7a_2)$ ,  $(7a_{11})$  e  $(7a_{12})$  a serem avaliados. Vá para o passo 4.

**Passo 8: Fim**

**5.4 Custo do aproveitamento do palhiço**

Florentino (2005), baseado em Ripoli (1991), apresentou um método para o cálculo do custo do aproveitamento do palhiço:

O recolhimento do palhiço é feito em quatro estágios: primeiro é enleirado, posteriormente passado por uma máquina de compactação, depois é acondicionado no caminhão (carregado) e finalmente transportado para o centro de processamento.

O custo por  $m^3$  para enleirar, compactar e carregar o caminhão com palhiço da variedade  $i$ ,  $C_i$ , em  $US\$.m^{-3}$ , é calculado da seguinte forma:

$$C_i = \frac{Cecc}{V_i} \dots\dots\dots(8)$$

onde:

$Cecc$  é o custo, por tonelada, para enleirar, compactar e carregar o caminhão com palhiço, em  $US\$.t^{-1}$ ;

$V_i$  é o volume ocupado por uma tonelada do palhiço da variedade  $i$  depois de compactada, em  $m^3.t^{-1}$ .

O custo calculado em (8) pode ser dado em  $US\$.ha^{-1}$  pela expressão ( $CC_i$ ):

$$CC_i = Q_i C_i \dots\dots\dots(9)$$

onde:

$Q_i$  é uma estimativa do volume do palhiço produzido pela variedade  $i$  por hectare de cana,  $m^3.ha^{-1}$ .

O custo ( $C_{D_j}$ ) para o caminhão percorrer a distância  $D_j$  do talhão  $j$  até a usina, em  $US\%$ , é determinado da seguinte forma:

$$C_{D_j} = D_j C_o P \dots\dots\dots(10)$$

onde:

$D_j$  é a distância em km,  $C_o$  é o consumo de combustível do caminhão a ser usado no transporte ( $L.km^{-1}$ ) e  $P$  é o preço do combustível em  $US\$.L^{-1}$ .

Assim o custo para transportar o palhiço de um hectare de cana da variedade  $i$  produzido no talhão  $j$  (em  $US\$.ha^{-1}$ ) é calculado por:

$$CT_{ij} = \left( \frac{Q_i}{V_c} \right) C_{D_j} \dots\dots\dots(11)$$

onde:

$V_c$  é o volume disponível do caminhão ( $m^3$ ).

Pode-se observar que o valor  $\left( \frac{Q_i}{V_c} \right)$  é o número de vezes que o caminhão necessita percorrer a distância  $D_j$  para transportar o palhiço gerado em um hectare de cana da variedade  $i$ , do talhão  $j$  ao centro de processamento.

Portanto, o custo de coleta do palhiço da cana da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$  é calculado pela expressão:

$$CC_{ij} = (CC_i + CT_{ij})L_j \dots\dots\dots(12)$$

onde:

$L_j$  é a área do talhão  $j$  (em ha).

### 5.5 Balanço de energia para o aproveitamento do palhiço

Florentino (2005), baseado em Ripoli (1991), apresentou também, um método para o cálculo do balanço de energia do aproveitamento do palhiço.

A energia proveniente do palhiço da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$ ,  $EB_{ij}$  (MJ) é calculada pela fórmula:



$$EB_{ij} = Ec_{Bi} P_{Bi} L_j \dots\dots\dots(13)$$

onde

$Ec_{Bi}$  é a energia calorífica do palhico da variedade  $i$  ( $MJ.t^{-1}$ );  
 $P_{Bi}$  é a estimativa da quantidade de palhico da variedade  $i$ , ( $t.ha^{-1}$ );  
 $L_j$  é a área (ha) do talhão  $j$ .

A energia do processo de transferência do palhico da variedade  $i$ , plantada no talhão  $j$ , para a usina ( $ET_{Bij}$ ) é dada pela soma de energia utilizada para enleirar e compactar ( $E_{ECij}$ ), carregar ( $E_{Cij}$ ) e transportar ( $E_{Tij}$ ) esta biomassa.

$$ET_{Bij} = E_{ECij} + E_{Cij} + E_{Tij} \dots\dots\dots(14)$$

onde:

$E_{ECij}$ ,  $E_{Cij}$  e  $E_{Tij}$  são as energia gastas para enleirar e compactar, carregar e transportar o palhico da variedade  $i$  do talhão  $j$  para a usina. Que são calculadas da seguinte forma:

$$E_{ECij} = Ec_{EC} L_j P_{Bi} \dots\dots\dots(15)$$

$$E_{Cij} = Ec_C L_j P_{Bi} \dots\dots\dots(16)$$

$$E_{Tij} = Ec_T D_j \frac{Q_i L_j}{V_C} \dots\dots\dots(17)$$

onde:

$Ec_{EC}$  é a energia consumida pelas máquinas, sob a forma de combustível, para enleirar e compactar o palhico por unidade de massa ( $MJ.t^{-1}$ );

$Ec_C$  é a energia consumida pela máquina para coleta do palhico por unidade de massa ( $MJ.t^{-1}$ );

$Ec_T$  é a energia consumida pelo caminhão em forma de combustível para o transporte do palhico, por quilômetro ( $MJ.km^{-1}$ );

$Q_i$  é uma estimativa do volume do palhiço produzido pela cana de variedade  $i$  por hectare de cana, ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ );

$V_c$  é a capacidade de carga do caminhão ( $m^3$ ).

O balanço de energia no aproveitamento do palhiço produzido pela cana de variedade  $i$ , plantada no talhão  $j$  ( $BE_{ij}$ ) é determinada pela fórmula:

$$BE_{ij} = EB_{ij} - ET_{Bij} \dots\dots\dots(18)$$

## 5.6 Material

Para resolução dos modelos propostos foram utilizados procedimentos computacionais. Tais procedimentos foram realizados utilizando os softwares e computadores do Laboratório Científico de Informática (LCI) do Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu. Foram utilizados os programas MATLAB 6.1.0.450 (R 12) (THE MATHWORKS INC. (1992)) e Excel em micro-computadores Pentium IV com 128 MB de RAM e 20 GB de disco rígido, adquiridos com os projetos FAPESP, processos 01/10393-2 e 04/0899.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os problemas abordados consistem em determinar quais variedades de cana-de-açúcar devem ser plantadas nos talhões da usina, que derivem palhiços com o menor custo possível de coleta e transporte e/ou que ofereça um balanço ótimo de energia no seu aproveitamento. Devendo satisfazer a demanda de sacarose e de fibra da usina, usar toda a área destinada para o plantio da cana e plantar apenas uma variedade de cana-de-açúcar em cada talhão.

Os modelos apresentados foram formulados usando técnicas de otimização e podem ser resolvidos através do método de programação linear inteira 0-1.

### **6.1 Modelagem matemática**

#### **6.1.1 Custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar**

O problema consiste em determinar quais das  $n$  variedades de cana-de-açúcar devem ser plantadas nos  $k$  talhões de área  $L_j$  (ha) e distância  $D_j$  (km) da usina que derive palhiços que ofereça o menor custo possível para o processo de transferência do campo até a usina. Devendo satisfazer as restrições de sacarose e de fibra da cana (recomendações da empresa para manter a qualidade da cana e a produtividade de açúcar e álcool), usar toda a área destinada para o plantio e garantir o plantio de apenas uma variedade de cana-de-açúcar em cada talhão.

Considerando  $X_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  e  $j = 1, 2, \dots, k$ , as variáveis de decisão, onde  $X_{ij} = 1$  implica que a variedade  $i$  deve ser plantada no talhão  $j$  e  $X_{ij} = 0$  em caso contrário. Assim, propõe-se o seguinte modelo para o problema de minimização do custo de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij} \dots\dots\dots(19)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i L_j X_{ij} \geq \bar{P} T \dots\dots\dots(20)$$

$$\bar{F}_1 T \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k F_i L_j X_{ij} \leq \bar{F}_s T \dots\dots\dots(21)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, k \dots\dots\dots(22)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{e} \quad j = 1, 2, \dots, k, \dots\dots\dots(23)$$

onde:

$i = 1, 2, \dots, n$  são as variedades;

$j = 1, 2, \dots, k$  são os talhões;

$CC_{ij}$  é calculado em (12);

$\bar{P}$  é a quantidade mínima estabelecida para a POL da cana ( $t \cdot ha^{-1}$ );

$A_i$  é a estimativa de produção de sacarose da variedade  $i$  ( $t \cdot ha^{-1}$ );

$F_i$  é a estimativa do teor de fibra da variedade  $i$  ( $t \cdot ha^{-1}$ );

$\bar{F}_1$  e  $\bar{F}_s$  são as quantidades mínimas e máximas estabelecidas para a fibra da cana ( $t \cdot ha^{-1}$ );

$L_j$  é a área (ha) do talhão  $j$ ;

$T$  é área total (ha) disponível para o plantio da cana-de-açúcar.

A função objetivo (19) minimiza o custo da coleta e transporte do palhiço do campo para a usina. A restrição (20) garante a demanda de açúcar fermentescível da usina, a restrição (21) garante a quantidade de fibra recomendada, as

restrições (22) garantem que toda a área destinada para plantio seja usada e também que seja plantado apenas uma variedade de cana por talhão e (23) são as variáveis de decisão.

### 6.1.2 Balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar

O problema consiste em determinar quais das  $n$  variedades de cana-de-açúcar devem ser plantadas nos  $k$  talhões de área  $L_j$  (ha) e distância  $D_j$  (km) da usina que derive palhiços que ofereça um balanço ótimo de energia no seu aproveitamento. Devendo satisfazer as restrições de sacarose e de fibra da cana (recomendações da empresa para manter a qualidade da cana e a produtividade de açúcar e álcool), usar toda a área destinada para o plantio e garantir o plantio de apenas uma variedade de cana-de-açúcar em cada talhão.

Considerando  $X_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  e  $j = 1, 2, \dots, k$ , as variáveis de decisão, onde  $X_{ij} = 1$  implica a variedade  $i$  deve ser plantada no talhão  $j$  e  $X_{ij} = 0$  em caso contrário. Propõe-se o seguinte modelo para problema de otimização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \text{BE}_{ij} X_{ij} \dots\dots\dots(24)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i L_j X_{ij} \geq \bar{P} T \dots\dots\dots(25)$$

$$\bar{F}_1 T \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k F_i L_j X_{ij} \leq \bar{F}_s T \dots\dots\dots(26)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, k \dots\dots\dots(27)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, k \dots\dots\dots(28)$$

onde:

$i = 1, 2, \dots, n$  são as variedades;

$j = 1, 2, \dots, k$  são os talhões;

$\text{BE}_{ij}$  é calculado em (18);

$\bar{P}$  é a quantidade mínima estabelecida para a POL da cana ( $t.ha^{-1}$ );

$A_i$  é a estimativa de produção de sacarose da variedade  $i$  ( $t.ha^{-1}$ );

$F_i$  é a estimativa do teor de fibra da variedade  $i$  ( $t.ha^{-1}$ );

$\bar{F}_1$  e  $\bar{F}_s$  são as quantidades mínimas e máximas estabelecidas para a fibra da cana ( $t.ha^{-1}$ );

$L_j$  é a área (ha) do talhão  $j$ ;

$T$  é a área total (ha) disponível para o plantio da cana-de-açúcar.

A função objetivo (24) maximiza o balanço de energia do processo. A restrição (25) garante a demanda de açúcar fermentescível da usina, a restrição (26) garante a quantidade de fibra recomendada, as restrições (27) garantem que toda a área destinada para plantio seja usada e também que seja plantado apenas uma variedade de cana por talhão e (28) são as variáveis de decisão.

### **6.1.3 Custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o balanço de energia.**

O Problema consiste em determinar quais  $n$  variedades de cana-de-açúcar devem ser plantadas nos  $k$  talhões de área  $L_j$  (ha) e distância  $D_j$  (km) da usina que derive palhiços que ofereça o menor custo possível em seu processo de transferência do campo até a usina. Devendo satisfazer as restrições de sacarose e de fibra da cana (recomendações da empresa para manter a qualidade da cana e a produtividade de açúcar e álcool), usar toda área destinada para o plantio, garantir o plantio de apenas uma variedade de cana-de-açúcar em cada talhão e garantir um valor mínimo para o balanço de energia no aproveitamento destes resíduos.

Considerando  $X_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  e  $j = 1, 2, \dots, k$ , as variáveis de decisão, onde  $X_{ij} = 1$  implica que a variedade  $i$  deve ser plantada no talhão  $j$  e  $X_{ij} = 0$ , em caso contrário. Propõe-se o seguinte modelo para o problema de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o balanço de energia:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij} \dots\dots\dots(29)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i L_j X_{ij} \geq \bar{P} T \dots\dots\dots(30)$$

$$\bar{F}_1 T \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k F_i L_j X_{ij} \leq \bar{F}_s T \dots\dots\dots(31)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k BE_{ij} X_{ij} \geq E \dots\dots\dots(32)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, k \dots\dots\dots(33)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \text{ onde } i=1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, k \dots\dots\dots(34)$$

onde:

$i = 1, 2, \dots, n$  são as variedades;

$j = 1, 2, \dots, k$  são os talhões;

$CC_{ij}$  é calculado em (12);

$BE_{ij}$  é calculado em (18);

$\bar{P}$  é a quantidade mínima estabelecida para a POL da cana ( $t \cdot ha^{-1}$ );

$A_i$  é a estimativa de produção de sacarose da variedade  $i$  ( $t \cdot ha^{-1}$ );

$F_i$  é a estimativa do teor de fibra da variedade  $i$  ( $t \cdot ha^{-1}$ );

$\bar{F}_1$  e  $\bar{F}_s$  são as quantidades mínimas e máximas estabelecidas para a fibra da cana ( $t \cdot ha^{-1}$ );

$E$  é o valor mínimo estipulado para o balanço de energia no aproveitamento do palhicho (MJ).

$L_j$  é a área (ha) do talhão  $j$ ;

$T$  é a área total (ha) disponível para o plantio da cana-de-açúcar.

A função objetivo (29) minimiza o custo de coleta e transporte do palhicho do campo para a usina, a restrição (30) garante demanda de açúcar fermentescível da usina, a restrição (31) garante a quantidade de fibra recomendada, a restrição (32)

garante que o balanço de energia no aproveitamento do palhiço seja maior ou igual a um valor pré-estabelecido, as restrições (33) garantem que toda a área destinada para plantio seja usada e também que seja plantado apenas uma variedade de cana por talhão e (34) são as variáveis de decisão.

#### 6.1.4 Balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar, com restrição sobre o custo de coleta e transferência destes resíduos até a usina.

O problema consiste em determinar quais das  $n$  variedades de cana-de-açúcar devem ser plantadas nos  $k$  talhões de área  $L_j$  (ha) e distância  $D_j$  (km) da usina que derive palhiços que ofereça um balanço ótimo de energia no seu aproveitamento. Devendo satisfazer as restrições de sacarose e de fibra da cana (recomendações da empresa para manter a qualidade da cana e a produtividade de açúcar e álcool), usar toda a área destinada para o plantio, garantir o plantio de apenas uma variedade de cana-de-açúcar em cada talhão e não ultrapassar um limitante sobre custo de coleta e transferência destes resíduos até a usina.

Considerando  $X_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  e  $j = 1, 2, \dots, k$ , as variáveis de decisão, onde  $X_{ij} = 1$  implica a variedade  $i$  deve ser plantada no talhão  $j$  e  $X_{ij} = 0$  em caso contrário. Propõe-se o seguinte modelo para problema de otimização do balanço de energia da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar com restrições de custo:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k BE_{ij} X_{ij} \dots\dots\dots(35)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i L_j X_{ij} \geq \bar{P} T \dots\dots\dots(36)$$

$$\bar{F}_1 T \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k F_i L_j X_{ij} \leq \bar{F}_s T \dots\dots\dots(37)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij} \leq C \dots\dots\dots(38)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, k \dots\dots\dots(39)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, k \dots\dots\dots(40)$$



onde:

$i = 1, 2, \dots, n$  são as variedades;

$j = 1, 2, \dots, k$  são os talhões;

$CC_{ij}$  é calculado em (12);

$BE_{ij}$  é calculado em (18);

$\bar{P}$  é a quantidade mínima estabelecida para a POL da cana ( $t.ha^{-1}$ );

$A_i$  é a estimativa de produção de sacarose da cana de variedade  $i$  ( $t.ha^{-1}$ );

$F_i$  é a estimativa do teor de fibra da cana de variedade  $i$  ( $t.ha^{-1}$ );

$\bar{F}_1$  e  $\bar{F}_s$  são as quantidades mínimas e máximas estabelecidas para a fibra da cana ( $t.ha^{-1}$ );

$L_j$  é a área (ha) do talhão  $j$ ;

$T$  é a área total (ha) disponível para o plantio da cana-de-açúcar;

$C$  é o custo máximo estipulado para a transferência do palhiço do campo até a usina (US\$).

A função objetivo (35) maximiza o balanço de energia do processo. A restrição (36) garante a demanda de açúcar fermentescível da usina, a restrição (37) garante a quantidade de fibra recomendada, a restrição (38) garante que o custo para a transferência do palhiço do campo até a usina seja menor ou igual a um valor pré-estabelecido, as restrições (39) garantem que toda a área destinada para plantio seja usada e também que seja plantado apenas uma variedade de cana por talhão e (40) são as variáveis de decisão.

Desta forma, tendo um valor máximo pré-estabelecido para investimentos no aproveitamento deste resíduo, podem-se determinar quais variedades devem ser plantadas de forma a obter um balanço ótimo da energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar.

## 6.2 Aplicação dos Modelos

Para a aplicação dos modelos utilizou-se os dados dos talhões apresentados no quadro 6 a seguir e os dados das variedades e dos maquinários, apresentados nos quadros 4 e 5, utilizando também as expressões (12) e (18). Portanto, o

modelo foi implementado com 11 variedades e 15 talhões, apresentando 165 variáveis e 18 restrições.

**Quadro 6:** Área do talhão  $j$  ( $L_j$ ) e distância do talhão  $j$  até a usina ( $D_j$ ) (fonte: Florentino, 2005).

Talhão	$L_j$	$D_j$
$j$	ha	km
1	17,60	14,00
2	17,05	22,00
3	18,29	12,00
4	22,17	24,50
5	21,22	13,00
6	10,60	16,50
7	13,25	14,00
8	16,96	16,00
9	18,70	20,00
10	15,36	15,50
11	16,84	23,50
12	19,88	22,00
13	21,82	29,00
14	19,42	15,00
15	21,59	22,50

Para a resolução dos modelos, utilizou-se o algoritmo *Branch and Bound* 0-1, o qual implementado com o uso do software MATLAB 6.1.0.450 (R 12) (THE MATHWORKS INC. (1992)) e Excel em micro-computadores Pentium IV, pertencentes ao Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu, adquiridos com os projetos FAPESP, processos 01/10393-2 e 04/08993-0.

### 6.2.1 Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar

O modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar foi implementado computacionalmente, utilizando os dados das variedades e talhões apresentados. O valor ótimo encontrado para o custo de coleta do palhiço nos 15 talhões descritos foi de US\$33322,26, plantando as variedades SP70-1284, RB806043 e RB835486 como mostra o quadro 7. Portanto, considerando os dados destas variedades e dos talhões descritos, observa-se que o custo para o recolhimento do palhiço é, em média, US\$123,07 por hectare. O modelo também apresenta as estimativas de 14,36 para a média de POL%cana e 11,04 para a média de fibra%cana.

**Quadro 7:** Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar.

Talhão j	Índice da variedade escolhida para o plantio	Descrição da variedade
1	1	SP70-1284
2	1	SP70-1284
3	1	SP70-1284
4	1	SP70-1284
5	1	SP70-1284
6	1	SP70-1284
7	1	SP70-1284
8	11	RB835486
9	1	SP70-1284
10	1	SP70-1284
11	1	SP70-1284
12	1	SP70-1284
13	1	SP70-1284
14	10	RB806043
15	10	RB806043
Média de POL (%): 14,36		
Média de fibra (%): 11,04		
<b>Custo ótimo: US\$33322,26</b>		

Observando o quadro 7, pode-se notar que a variedade SP701284 foi escolhida para plantio em quase todos os talhões, em 12 dos 15 disponíveis, e esta pode ser uma situação indesejável para o produtor. Para evitar esta situação, foram adicionadas as seguintes restrições ao modelo, limitando o número de talhões por variedade:

$$\sum_{j=1}^k X_{ij} \leq M, \text{ para } i = 1, \dots, n \dots \dots \dots (41)$$

onde,

M é o número máximo de talhões que deve ser plantada a variedade i.

Adicionando estas restrições ao problema e supondo que o produtor deseja plantar cada variedade de cana-de-açúcar em no máximo quatro talhões, o modelo escolheu as variedades SP70-1284, SP70-1143, RB72454 e RB835486 para o plantio, com valor ótimo de US\$37892,92, ou seja, um acréscimo de US\$4570,66 em relação ao resultado anterior, com estimativas de 14,3 para a média de POL%cana e 11,02 para a média de fibra%cana, conforme o quadro 8.

**Quadro 8:** Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com a inclusão das restrições (41).

Talhão j	Índice da variedade escolhida para o plantio	Descrição da variedade
1	11	RB835486
2	3	SP70-1143
3	11	RB835486
4	1	SP70-1284
5	1	SP70-1284
6	6	RB72454
7	6	RB72454
8	3	SP70-1143
9	3	SP70-1143
10	6	RB72454
11	3	SP70-1143
12	11	RB835486
13	1	SP70-1284
14	11	RB835486
15	1	SP70-1284
Média de POL (%): 14,30		
Média de fibra (%): 11,02		
<b>Custo ótimo: US\$37892,92</b>		

### 6.2.2 Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar

O modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar foi implementado computacionalmente, utilizando os dados das variedades e talhões apresentados. O valor ótimo encontrado para o balanço de energia do aproveitamento do palhiço nos 15 talhões descritos foi de 75727426 MJ, plantando as variedades RB855113 e RB806043, como mostra o quadro 9. O modelo apresenta as estimativas de 17,76 para a média de POL%cana e 11,26 para a média de fibra%cana.

**Quadro 9:** Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhicho da cana-de-açúcar.

Talhão j	Índice da variedade escolhida para o plantio	Descrição da variedade
1	9	RB855113
2	9	RB855113
3	9	RB855113
4	10	RB806043
5	9	RB855113
6	9	RB855113
7	9	RB855113
8	9	RB855113
9	9	RB855113
10	9	RB855113
11	9	RB855113
12	9	RB855113
13	9	RB855113
14	9	RB855113
15	9	RB855113
Média POL (%): 17,76		
Média de fibra (%): 11,26		
<b>Balanço de energia ótimo: 75727426 MJ</b>		

Como mostra o quadro 9, a variedade RB855113 deve ser plantada em quase toda a área para obter o balanço ótimo de energia. Adicionando as restrições (41) ao problema e supondo que o produtor deseja plantar cada variedade de cana-de-açúcar em no máximo quatro talhões, o modelo escolheu as variedades SP71-1406, RB855536, RB855113 e RB806043 para o plantio, conforme o quadro 10. O valor ótimo encontrado para o balanço de energia foi de 71608909 MJ, ou seja, uma diferença de 4118517 MJ a menos no balanço de energia em relação ao resultado anterior, estimativas de 17,2 para a média de POL%cana e 12,46 para a média de fibra%cana.

**Quadro 10:** Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhico da cana-de-açúcar com a adição das restrições (41).

Talhão j	Índice da variedade escolhida para o plantio	Descrição da variedade
1	4	SP71-1406
2	4	SP71-1406
3	10	RB806043
4	9	RB855113
5	9	RB855113
6	7	RB855536
7	7	RB855536
8	4	SP71-1406
9	10	RB806043
10	7	RB855536
11	4	SP71-1406
12	10	RB806043
13	9	RB855113
14	10	RB806043
15	9	RB855113
Média de POL (%): 17,2		
Média de fibra (%): 12,46		
<b>Balanço de energia ótimo: 71608909 MJ</b>		

### 6.2.3 Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhico da cana-de-açúcar com restrição sobre o balanço de energia

O modelo de minimização do custo de coleta do palhico da cana-de-açúcar com limitante inferior sobre o balanço de energia foi implementado computacionalmente. O custo ótimo foi de US\$33931,58 com balanço de energia restrito a ser no mínimo 41170384MJ e estimativas de 14,61 para a média de POL%cana e 11,22 para a média de fibra%cana, plantando as variedades SP70-1284 e RB806043, como mostra o quadro 11.

**Quadro 11:** Resultado da aplicação do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o balanço de energia

Talhões j	Índice da variedade escolhida para o plantio	Descrição da variedade
1	1	SP70-1284
2	1	SP70-1284
3	10	RB806043
4	1	SP70-1284
5	10	RB806043
6	1	SP70-1284
7	10	RB806043
8	1	SP70-1284
9	1	SP70-1284
10	1	SP70-1284
11	1	SP70-1284
12	1	SP70-1284
13	1	SP70-1284
14	1	SP70-1284
15	1	SP70-1284
Média de POL (%): 14,61		
Média de fibra (%): 11,22		
Balanço de energia: 41170384 MJ		
<b>Custo ótimo: US\$33931,58</b>		

Inserindo as restrições (41) no modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o balanço de energia e supondo que o produtor deseja plantar cada variedade de cana-de-açúcar em no máximo quatro talhões, o modelo escolheu as variedades SP70-1284, SP70-1143, RB72454 e RB835486 para o plantio, com custo de US\$37892,92 e balanço de energia de 43451749 MJ no aproveitamento do palhiço, estimativas de 14,3 para a média de POL%cana e 11,02 para a média de fibra%cana, conforme o quadro 12.



**Quadro 12:** Resultado do modelo de minimização do custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o balanço de energia com as restrições (41).

Talhão j	Índice da variedade escolhida para o plantio	Descrição da variedade
1	11	RB835486
2	3	SP70-1143
3	11	RB835486
4	1	SP70-1284
5	1	SP70-1284
6	6	RB72454
7	6	RB72454
8	3	SP70-1143
9	3	SP70-1143
10	6	RB72454
11	3	SP70-1143
12	11	RB835486
13	1	SP70-1284
14	11	RB835486
15	1	SP70-1284
Média de POL (%): 14,3		
Média de fibra (%): 11,02		
Balanço de energia: 43451749 MJ		
<b>Custo ótimo: US\$37892,92</b>		

#### 6.2.4 Resultado da aplicação do modelo de maximização de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar com restrição sobre o custo de coleta

O modelo de maximização de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar com limitante superior sobre o custo de coleta do palhiço, foi implementado computacionalmente. O balanço de energia ótimo encontrado foi 75727425MJ com um custo de US\$59668,00 e estimativas de 17,75 para a média de

POL%cana e 11,26 para a média de fibra%cana, plantando as variedades RB855113 e RB806043, como mostra o quadro 13.

**Quadro 13:** Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar com restrições sobre o custo de coleta.

Talhão j	Índice da variedade escolhida para o plantio	Descrição da variedade
1	9	RB855113
2	9	RB855113
3	10	RB806043
4	9	RB855113
5	9	RB855113
6	9	RB855113
7	9	RB855113
8	9	RB855113
9	9	RB855113
10	9	RB855113
11	9	RB855113
12	9	RB855113
13	9	RB855113
14	9	RB855113
15	9	RB855113
Média de POL (%): 17,75		
Média de fibra (%): 11,26		
Custo de recolhimento: US\$59668,00		
<b>Balanço de energia ótimo: 75727425MJ</b>		

Inserindo as restrições (41) no modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar com limitante superior sobre o custo de coleta e supondo que o produtor deseja plantar cada variedade de cana-de-açúcar em no máximo quatro talhões, o modelo escolheu as variedades SP71-1406, RB855536, RB855113 e RB806043 para o plantio, com valor ótimo do balanço de energia de 71608909 MJ com um custo de US\$59523,37 para o aproveitamento do palhiço e

estimativas de 17,20 para a média de POL%cana e 12,46 para a média de fibra%cana, veja o quadro 14.

**Quadro 14:** Resultado da aplicação do modelo de maximização do balanço de energia no aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar com restrições sobre o custo de coleta com as restrições (41).

Talhão j	Índice da variedade escolhida para o plantio	Descrição da variedade
1	4	SP71-1406
2	4	SP71-1406
3	10	RB806043
4	9	RB855113
5	9	RB855113
6	7	RB855536
7	7	RB855536
8	4	SP71-1406
9	10	RB806043
10	7	RB855536
11	4	SP71-1406
12	10	RB806043
13	9	RB855113
14	10	RB806043
15	9	RB855113
Média de POL (%): 17,20		
Média de fibra (%): 12,46		
Custo de recolhimento: US\$59523,37		
<b>Balanço de energia ótimo: 71608909 MJ</b>		

## 7 CONCLUSÃO

O aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar como fonte de energia tem demonstrado ser bastante interessante, visto a crescente disponibilidade desta matéria prima, o alto potencial energético e a viabilidade econômica no seu aproveitamento.

O sucesso de uma empresa sucroalcooleira está ligado ao adequado sistema de produção agrícola que fornecerá a matéria prima. Assim, a modelagem matemática pode auxiliar muito nas gestões deste sistema nas usinas, fornecendo estimativas e auxiliando nas tomadas de decisões.

Os modelos de programação linear inteira, apresentados neste trabalho, mostraram ser uma excelente ferramenta para auxílio na escolha de variedades a serem plantadas de modo a fornecer uma estimativa de menores custos para transferência do palhiço do campo para a usina e uma ótima estimativa para o balanço de energia no aproveitamento destes resíduos, garantindo a produção de POL, teor médio de fibra, plantio em toda área destinada e garantindo satisfazer as restrições estabelecidas pelas usinas.

Além do fator econômico, com o aproveitamento do palhiço, a empresa colabora com a preservação do meio ambiente, através da colheita sem queima prévia do canavial e com a produção de energia limpa e renovável, e ao mesmo tempo, valoriza seus produtos em níveis nacionais e internacionais.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMO FILHO, J.; MATSUOKA, S.; SPERANDIO, M.L.; RODRIGUES, R.C.D.; MARCHELLI, L.L. Resíduos de colheita mecanizada de cana crua. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, n.67, p.23-25, abr./jun. 1993.

ADLER, I.; RESENDE, M. G. C.; KARMARKAR, N. An Implementation of Karmarkar's algorithm for Linear Programming. *Mathematical Programming*, v. 44, p.297-335, 1989.

ALMEIDA FILHO, A.J. **Impacto ambiental da queima da cana-de-açúcar sobre a entomofauna**. 64 p. Tese (Doutorado em Entomologia [Esalq]) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

AVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C. Crescimento da parte aérea de cana crua e queimada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v.56, p.1069-1079, 1999.

AREVALO, R. A.; BERTONCINI, E. I. Manejo químico de plantas daninhas nos resíduos de colheita de cana crua. **STAB, Açúcar, Álcool Subprodutos**, Piracicaba, SP, v. 17, n. 4, p. 36-38, 1999.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira – 2006**. Disponível em: <[http://www.anfavea.com.br/anuario2006/Cap02\\_2006.pdf](http://www.anfavea.com.br/anuario2006/Cap02_2006.pdf)>. Acesso em 20 de setembro de 2006.

ASSOCIAÇÃO PAULISTA DE CO-GERAÇÃO DE ENERGIA (COGEN). **Portal GD Geração Distribuída, Canal Energia**. Disponível em: < <http://www.cogensp.com.br/cogensp/cogera7.htm> > Acesso em 25 de agosto de 2006.

AUDE, M. I. S.; MARCHEZAN, E.; DARIVA, T.; PIGNATARO, I. H. B. Manejo do palhicho da cana-de-açúcar: 1. Efeito na produção de colmos industrializáveis e outras características agrônômicas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 3, p. 281-286, 1993.

BALAS, E., CERIA, S., CORNUÉJOLS G. Mixed 0-1 Programming by Lift-and-Project in a Branch-and-cut Framework. *Management Science*, v.42, p.9, 1996.

BALAS, F., Na Additive Algorithm for Solving Linear Programs with Zero – One Variables, *Operations Research*, v. 13, 152p, 1965.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: **PLANALSUCAR – Coordenadoria Regional do Sul – COSUL**, Araras, p.1-22, 1977.

BASESCU, V.L., MITCHELL, J.E. **An analytic center cutting plane approach for conic programming**. Disponível em: <[hp://www.optimization-online.org/DB\\_FILE/2005/06/1157.pdf](http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2005/06/1157.pdf)>. Acesso em 18 de novembro de 2005.

BASSINELLO, A. I.; FURLANI NETO, V. L.; MACEDO, N.; PARRAZI, C.; CASAGRANDI, J. C. **Implicações agrícolas e industriais da colheita da cana crua**. Araras: IAA, Planalsucar, s.d. 55p.

BAZARAA, M. S.; JARVIS, J.J. **Linear Programming and Network Flows**, New York, John Wiley & Sons, 565p, 1977.

BAZARAA, M. S; JARVIS, J; SHERALI, H. D. **Linear programming and network flows**. 2ed. New York: Wiley, 1990.

BEEHARRY, R.P. Strategies for augmenting sugarcane biomass availability for power production in Mauritius. *Biomass & Bioenergy*, v.20, p. 421-429, 2001.

BEEHARRY, R.P. Carbon balance of sugarcane bioenergy systems. *Biomass & Bioenergy*, v. 20, p.361-370, 2002.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos na utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Secretária de Ciências e Tecnologia, 1982. p. 101-108.

CAMARA, G. M. S. Cana-de-ano. In: Enciclopédia Agrícola Brasileira, EDUSP, São Paulo, v.2 C-D, 1998, p.123.

CAMPOS, M.S.; MARCONATO, A. Sistema de cana crua x cana queimada. CLASS 2000. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.12, n.3, p.10-16, jan./fev. 1994.

CARVALHO, E. O álcool biocombustível é a grande saída para agronegócio da cana. **Agroanalysis – A revista de agronegócios da FGV**, v.23, 2005

CASTRO, P.R.C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: SEMANA DA CANA-DE-AÇÚCAR DE PIRACICABA, 4., 1999, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Saccharum, v.1, p.-12-16, 1999.

CAVALI, R., RANGEL, S. Production Planning: A Cutting Stock Problem In The Furniture Industry. In: XII Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación de Operaciones y Sistemas - CLAIO, 2004, Havana. **Anais do XII CLAIO**. Havana, 2004. v. único. p. T137.

CEDDIA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L. A. Alterações nas propriedades físicas e mesofauna de solo podzólico amarelo sob diferentes sistemas de corte da cana-de-açúcar. (compact disc). In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Anais ...** Águas de Lindóia: SBCS/SLCS, 1996.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA (CTC). **Alternativas energéticas a partir da cana-de-açúcar.** Disponível em: <[www.ctc.com.br/php/pagina.php?doc=eventos-gef](http://www.ctc.com.br/php/pagina.php?doc=eventos-gef)> Acesso em 20 de novembro de 2005.

CERIA, S., CORDIER, C., MARCHAND, H., WOLSEY, L.A. Cutting Planes for Integer Programs with General Integer Variables. *Mathematical Programming*. Springer-Verlag, New York, Inc. Series A and B, v.81, p.201-214, 1998.

CHARNES, A. Optimality and Degeneracy in Linear Programming, *Econometria*, v.20, n.2, 1952

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - (CONAB): **Cana-de-açúcar, Safra 2006/2007, Segundo Levantamento, Agosto de 2006.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/BoletimCanaagosto2006-07.pdf>>. Acesso em 20 de setembro de 2006.

DANTIZIG, G. B. **Programming in a linear structure, comptroller, United States Air Force.** Washington, D. C., 123 p, 1949.

DARBY-DOWMAN, K., RANGEL, S. The Application of Preprocessing and Cutting Planes for a Class of Production Planning Problems, *Computational Optimization and Applications*, The Netherlands, v.11, p. 297-318, 1998.

DELGADO, A. A. Os efeitos da queima dos canaviais. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 3, n. 6, p. 2-5, jul/ago. 1985.

DOAT, A. Le pouvoir calorifique des bois tropical. **Bois et Forest des Tropiques, Nogent. Sur-Marne**, v.172, p. 33-48, 1977.

DOOREMBOS, J.; KASSAN, A.H. **Yield response to water.** Rome: FAO, 212p, 1979. (FAO. Irrigation and drainage paper, 33).



DIETRICH, B.L., ESUDERO, L.F. On tightening cover induced inequalities. *European Journal of Operational Research*. 60p. 335-343, 1992.

FERNANDES, A. J. **Manual da cana-de-açúcar**, Piracicaba SP, Livro ceres, 145p, 1984.

FLORENTINO, H.O.; SARTORI, M.M.P. Game theory in sugarcane crop residue and available energy optimization, *Biomass & Bioenergy*, v.25, n. 01,p. 29-34, 2003.

FLORENTINO, H.O. **Programação linear inteira em problemas de aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar**. 2005, 64 p. Tese (Livre Docência) Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2005.

FLORENTINO, H.O. **Relaxação lagrangeana em programação inteira**. USP, São Carlos, 89p, 1990.

FRANCO, A. R. **Aspetos médicos e epidemiológicos da queima de canaviais na região de Ribeirão Preto**. Ribeirão Preto: USP, Centro de Estudos Brasileiros, 19p, 1992.

FURLANI NETO, V. L.; RIPOLI, T. C. C.; VILLA NOVA, N. A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhicho remanescente de colheita mecânica. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 15, n. 4, p. 24-27, mar/abr. 1997.

GOMORY, R. E. Outline of an algorithm for integer solutions to linear programs. *Bulletin of the American Math. Society*, New York, v.64, p. 275-278, 1958.

GONÇALVES, D. B. **A regulamentação das queimadas e as mudanças nos canaviais paulistas**. São Carlos, v.1, 127 p, 2002.

GONÇALVES, J. S., VEIGA FILHO, A. A. Açúcar e álcool. **Prognóstico agrícola**, São Paulo, v. 2, p. 141-150, 1998.

GONDRAN, M., MINOUX, M. **Graphes et algorithmes collection de la direction des études et recherches**, EDF, Eurolles, Paris, 1979.

GONDZIO, J. Multiple centrality corrections in a primal-dual method for linear programming, *Computational Optimization and Applications*, v.6, p.137 – 156, 1996.

GONZAGA,C.C. Algoritmos de Pontos Interiores para Programação Linear, **IMPA**, Rio de Janeiro, 1989.

GRAMANI, M.C.N., FRANÇA, P.E., ARENALES, M.N. An exact approach to the combined production planning model. In: IV SIMPOI/POMS 2001, 2001, Guarujá. **IV Simpoi/Poms 2001**, Guarujá, IV SIMPOI/POMS 2001, p. 28-35, 2001.

GRANVILLE, S. Optimal reactive power dispatch through interior point methods. *IEEE Transactions on Power Systems*. Piscataway, NJ, USA, v.9, n. 1, p.136-146, 1994.

GRASSI, G., PALZ, W. O futuro da biomassa na União Européia. **Álcool & Açúcar**, n. 76, p. 28-34, 1994.

GUERREIRO, J., MAGALHAES, A., RAMALHETE, M. **Programação Linear**. Lisboa: Mcgraww-hill, v 2, 357p, 1985

KARMAKAR, N. A new polynomial time algorithm for linear programming. **Combinatorica**, New York, v.4, p.376-395, 1984.

HILLIER, F. S; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operations research**. New York: Mc-Graw Hill, 320p, 2000.

HUANG, W., YUAN, L., LEE, C. Linking genetic algorithms with stochastic dynamic programming to the long-term operation of a multireservoir system. *Water Resources Research*, v. 38, n.12, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATISTICA (IBGE). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em:<[http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_impresao.php?id\\_noticia=551](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_impresao.php?id_noticia=551)>. Acesso em 15 de Junho de 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Radiative forcing of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 339p, 1995.

JUNHO, J. A. C. **Normas técnicas para produção de mudas selecionadas de cana-de-açúcar**, Campinas: CATI, 58p, 2003.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisão: Modelagem em Excel**. 2° ed.- ° ed.- Rio de Janeiro: Elsevier, 321p, 2004.

LAND, A. H., DOING, A.G. An automatic method for solving discrete programming problems. **Econometria**, v.28, p. 497- 520, 1960.

LASDON, L.S. **Optimization theory for large systems**. Macmillan, New York, 523p, 1970.

LIMA, M. A.; LIGO, M. A. V.; CABRAL, M. R.; BOEIRA, R. C.; PESSOA, M. C. P. Y.; NEVES, M. C. Emissão de gases de efeito estufa provenientes da queima de resíduos agrícolas no Brasil. Jaguariúna: **EMBRAPA Meio Ambiente** 1999. 60p.

LOPEZ, P. A. **Recolección de barbojo com fuente energética em el central romana**. In: Grupo de países latino americanos y del caribe exportadores de azúcar. Uso alternativo de la cana de azúcar para energia y alimento. México, p. 57-62, 1987.

LUENBERGER, D.G. **Introduction to Linear and Nonlinear Programming**. Second Edition, Addison-Wesley, 560p, 1984.

LUSTIG, I.J., MAARSTEN, R.E., SHANNO, D.F. On implementing Mehrotra's predictor-corrector interior point method for linear programming, *SIAM J. Optimization*, v.2, p.435-449, 1992.

MACEDO, N.M.; BOTELHO, P.S.M.; CAMPOS, M.B.S. Controle químico de cigarrinha-da-raiz em cana-de-açúcar e impacto sobre a população de artrópodes. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.21, p.30-33, 2003.

MACEDO, N.A. **Manual de técnicas em histologia vegetal**. Feira de Santana: Universidade Estadual Feira de Santana, 96 p, 1997.

MAGALHÃES, A.C.N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T.; (Coord.) **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: POTAFOS, p.113-118, 1987.

MAGRO, J. A. Variedade de cana para colheita sem queima. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba v. 14, n. 4, p. 15, 1996.

MEHROTRA, S. On the implementation of a primaldual interior point method, *SIAM Journal on Optimization*, v.2, n.4, p.575-601, 1992.

MITCHEL, J.E. Branch-and-Cut Algorithms for Combinatorial Optimization Problems. *Handbook of Applied Optimization*. Oxford University Press, p. 65-77, 2002.

MOMOH, J. A.; EL-HAWARY, M.E.; ADAPA, R. A review of selected optimal power flow literature to 1993, part II Newton, linear programming and interior point methods. *IEEE Transactions on Power Systems*. v.14, n.1, p.105-111, 1999.

MOREIRA, J. R. Etanol from cellulosic materias. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. (Ed.). **Industrial uses of biomass energy**. London: Taylor-Francis, p. 228-229, 2000.

OLIVEIRA, A.L.R., LYRA, C. Implementação de um método de pontos interiores para a programação linear. **SBA: Controle & Automação**. v.3, n.2, p. 370-382, 1991.

OLIVEIRA, A. R. L. ; LYRA, C. . Interior Point Methods for the Polynomial  $L_{\infty}$  Fitting Problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 11, n. 3, p. 309-322, 2004.

ORLANDO FILHO, J.; MACEDO N.; TOKESHI, H. **Seja doutor do seu canavial. Informações Agrônomicas**, Piracicaba: POTAFOS, n.67, p.17, set. 1994.

ORTOLAN, M. Setor sucroalcooleiro registra novo recorde de produção na safra 2004/2005 e comemora crescimento de 32% em relação ao período anterior. **Revista Álcoobras**, n. 88, 2004.

PARDALOS, P., RESENDE, M. **Handbook of Applied Optimization**. Oxford University Press, New York, NY. 230p, 2002.

PERIN, C., RANGEL, S. O problema do corte bidimensional. In: XII CNMAC, 1989. **Caderno de Resumos do XII CNMAC**. São Jose do Rio Preto, p. 20 -26 1989.

PINHEIRO, L.B.A.; SANTOS, G.A; GARAY, I.E. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar na população de macroartrópodos edáficos. (compact disc). In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13. Águas de Lindóia, 1996. **Anais... Águas de Lindóia: SBCS/SLCS**, p. 34-46, 1996.

QUINTANA, V. H., TORRES, G. L.; MEDIANA-PALOMO, J. Interior-Point Methods and Their Applications to Powers Sytems: A classification of publications and software codes, *IEEE Transactions on Power Systems*. Piscataway, NJ, USA, v.15, n.1, p.170–176, 2000.

RAMALHETE, M., GUERREIRO, J., MAGALHÃES, A. **Programação Linear**. Lisboa: Mcgraww-hill, v 1, 285p, 1984.

RANGEL, S., FERREIRA, D. Um modelo de dimensionamento de lote para uma fábrica de refrigerantes. **Tema Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, São José do Rio Preto – SP, v.4, p. 237-246, 2003.

RIPOLI, M.L.C. **Ensaio de dois sistemas de colheita da biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) para fins energéticos**. Botucatu, 2004. 213 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2004.

RIPOLI, M.L.C. **Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e do seu potencial energético**. 2002. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2002.

RIPOLI, M.L.C.; RIPOLI, T.C.C.; GAMERO, C. A. Colheita integral: retrocesso ou barateamento do sistema? **IDEA News**, Ribeirão Preto, ano 4, n. 28, p. 66-67. jan. 2003c.

RIPOLI, T. C. C. **Utilização do material remanescente da colheita da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) Equacionamento dos balanços energético e econômico**. 1991. 150 p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1991.

RIPOLI, T. C. C.; PARANHOS, S. B. Colheita. In: PARANHOS, S. B. (Coord.) Cana-de-açúcar, cultivo e utilização. **Campinas: Fundação Cargill**, Campinas, v. 2, cap. 5, p. 517-597, 1987.

RIPOLI, T. C. C. Fogo na Palha? **Noticias da ESALQ**, Piracicaba, v. 1, n. 5, p 2-3, nov. 1988.

RIPOLI, T.C.C. RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba SP, 320 p, 2004.

RIPOLI, T. C. C., VILLA NOVA, N. A. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar: novos desafios. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.11, n.1. p. 28-31, set./out. 1992.

SAFFIOT, W. O. **Desperdício de energia na queima dos canaviais**. Revista Pau Brasil, São Paulo, p. 40-43, nov/dez. 1985.

SARTORI, M.M.P. **Métodos matemáticos para a determinação de consumo de energia e de custos de produção da cultura de cana-de-açúcar (*saccharum spp*)**. 1996. 54 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 1996.

SARTORI, M.M.P. **Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar**. 2001. 108 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2001.

SARTORI, M.M.P.; FLORENTINO, H.O. Avaliação de modelos de minimização de biomassa residual, **Bragantia**, Campinas, v. 61, p. 297-303, 2002.

SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Irrigação da cana-de-açúcar. In: Paranhos, S. B. (Coord.) Cana-de-açúcar: Cultivo e utilização. **Campinas: Fundação Cargill**, Campinas, v.1, p.373-431, 1987.

SCHINEIDER, L. C.; KINZIG, A. P.; LARSON, E. D.; SOLÓRZANO, L. A. Method for spatially explicit calculations of potential biomass yields and assessment of land availability for biomass energy production in Northeastern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier Science. v.8, p. 207–226, 2001.

SHERALI, H.D., DRISCOLL, P.J. Evolution and state-of-art in integer programming **Journal of Computation and Applied Mathematics**, Elsevier Science, v. 124, p. 319-340, 2000.

SPAROVECK, G.; ALLEONI, L. R. F.; PEREIRA, J. C.; ROSSETO, R. Aptidão das terras de Piracicaba para o corte mecanizado de cana-de-açúcar. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba. v.15, n. 15, p. 14-17, 1997.

STEUER, R.E. **Multiple criteria optimization-theory, computation and application**. 2<sup>nd</sup> edition. Krieger, Malabar, Florida, p. 282-310, 1989.

THARA, H.A. **Integer programming: theory, applications and computations**. Academic Press, New York, 220p, 1975.

TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; OLIVEIRA, M.W. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo. Parte I: Estabilidade química da mistura. **STAB, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.16, n.2, p.26-29, 1997.

UNIÃO CANAVIEIRA DE SÃO PAULO, (UNICA) **Produção da cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br/portalunica/producao>> Acessado dia: 20 de novembro de 2005.

UNIÃO CANAVIEIRA DE SÃO PAULO, (UNICA). **Cenários 2006/2007: cana, açúcar e álcool**. Disponível em: <<http://portalunica.com.br/cenario2006/2007>> Acessado dia: 24 de agosto de 2006.

USTILIN, E.J.; SEVERO, JR. Cana de açúcar: proteger o ambiente e continuar gerando empregos. **Revista Gleba**, Piracicaba, 2001. Disponível em: <<http://www.cna.org.br//gleba99/2001/Set/cana01.htm>> Acesso em 29 de agosto de 2006.

VANDERBEI, R.J. Symmetric quase-definite matrices, *SIAM J. Optimization*. v.5, n.1, p.100-113, 1995.

VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita**. 2002. 140p. Tese (Doutorado em



Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2002.

VELINI, E. D.; NEGRISOLI, E. Controle de plantas daninhas em cana crua. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 22., 2000, Foz do Iguaçu. **Palestras...** Foz do Iguaçu: 2000. p. 148-164.

VERA, J.R., WEINTRAUB, A. A., KOENIG, M., BRAVO, G., GUIGNARD, M., BARAHONA, F. A lagrangean relaxation approach for a machinery location problem in Forest harvesting. **Pesquisa Operacional**, v.23, p. 111-128, 2003.

WOOD, AW. **Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland**. Soil and Tillage Research, v. 20, p. 69-85, jul/ago 1991.

WRIGHT, S.J. **Primal-dual interior-point methods**. SIAM Publications, SOAM, Philadelphia, PA. USA, 407p, 1996

ZANCUL, A. **O efeito da queimada de cana-de-açúcar na qualidade do ar em Araraquara**. São Carlos, 1998. 99p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlo, Universidade de São Paulo, 1988.

ZULAUF, W.E.; CAPORALI, S. A.; VIPEIRA, R. M. Cálculo preliminar da energia liberada anualmente na queima dos canaviais brasileiros. In: SIMPÓSIO SOBRE QUEIMA DA PALHA DE CANAVIAIS, v.2, 1985, Araraquara, **Resumos...** p. 1-7.