

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

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA MAXIMIZAÇÃO DA
PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp.*) E IMPACTOS
SOBRE O CUSTO DE OPERAÇÕES MECANIZADAS DE CORTE E
CARREGAMENTO**

RICARDO GHANTOUS CERVI

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP –
Câmpus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP
Outubro – 2013

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

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA MAXIMIZAÇÃO DA
PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp.*) E IMPACTOS
SOBRE O CUSTO DE OPERAÇÕES MECANIZADAS DE CORTE E
CARREGAMENTO**

RICARDO GHANTOUS CERVI

Orientadora: Profa. Dra. Maura Seiko Tsutsui Esperancini

Co-orientadora: Profa. Dra. Helenice de Oliveira Florentino Silva

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP –
Câmpus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU-SP
Outubro – 2013

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

Cervi, Ricardo Ghanthous, 1980-
C419m Modelagem matemática para maximização da produção da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) e impactos sobre o custo de operações mecanizadas de corte e carregamento / Ricardo Ghanthous Cervi. - Botucatu : [s.n.], 2013
vi, 97 f. : ils. color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2013
Orientador: Maura Seiko Tsutsui Esperancini
Coorientador: Helenice de Oliveira Florentino Silva
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar - Colheita. 2. Cana-de-açúcar - Modelos matemáticos. 3. Produtividade agrícola - Custos. I. Esperancini, Maura Seiko Tsutsui. II. Silva, Helenice de Oliveira Florentino. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

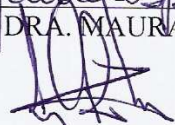
TÍTULO: "MODELAGEM MATEMÁTICA PARA MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO
DA CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp.) E IMPACTOS SOBRE O
CUSTO DE OPERAÇÕES MECANIZADAS DE CORTE E
CARREGAMENTO"

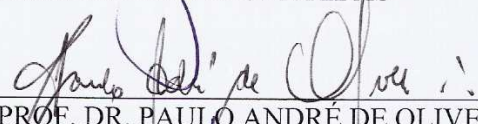
ALUNO: RICARDO GHANTOUS CERVI

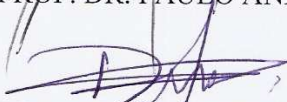
ORIENTADORA: PROFA. DRA. MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI

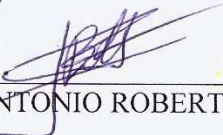
Aprovado pela Comissão Examinadora


PROFA. DRA. MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI


PROF. DR. LUIZ CESAR RIBAS


PROF. DR. PAULO ANDRÉ DE OLIVEIRA


PROFA. DRA. DANIELA RENATA CANTANE


PROF. DR. ANTONIO ROBERTO BALBO

Data da Realização: 25 de outubro de 2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado à vida e saúde para realização deste trabalho.

A minha família pelo apoio, carinho, e principalmente pelo incondicional amor que sempre me deram.

A minha orientadora Professora Doutora Maura Seiko Tsutsui Esperancini, pelos ensinamentos e orientação. A minha co-orientadora Professora Doutora Helenice de Oliveira Florentino Silva, pelos ensinamentos e apoio nas discussões deste estudo.

Ao Senhor Ederval José de Almeida, pela atenção e disposição no auxílio técnico para a coleta dos dados deste trabalho.

Ao Professor Mestre Paulo Roberto Isler, pela amizade, ensinamentos e dedicação inigualável que foram determinantes para a conclusão deste estudo.

Ao Professor Mestre Angelo Aliano Filho pelas contribuições e sugestões na programação computacional deste trabalho.

Ao Professor Mestre Sergio Augusto Rodrigues e a Professora Mestra Gislaíne Cristina Batistela pela amizade e auxílio no tratamento estatístico dos dados.

Às Professoras Doutora Adriane Belluci Belório de Castro e Mestra Maria Fernanda Martins pela amizade e correções textuais deste trabalho.

Aos meus amigos de curso Danilo Simões, Daniel Viais Neto, Fernando Bergantini Miguel, Ricardo Nakamura, Rômulo Pimentel Ramos, Ricardo Araújo Ferreira Júnior pela amizade e apoio nas disciplinas.

A todos os docentes das disciplinas cursadas no programa de Pós-Graduação, pelos ensinamentos e conselhos. Aos funcionários do Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia e às funcionárias da Seção de Pós-Graduação pelo atendimento sempre impecável.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Câmpus de Botucatu, e a coordenação do Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Energia na Agricultura.

Aos funcionários da biblioteca Prof. Paulo de Carvalho Mattos.
Muito Obrigado.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	V
LISTA DE FIGURAS	VI
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
4.1 Breve histórico da cana-de-açúcar no Brasil	8
4.2 Participação dos produtos da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira....	10
4.3 Caracterização da produção de cana-de-açúcar no Brasil	13
4.3.1 Processos agrícolas na produção de cana-de-açúcar	14
4.3.1.1 Preparo do solo	16
4.3.1.2 Plantio	16
4.3.1.3 Tratos culturais	17
4.3.1.4 Colheita.....	18
4.3.1.5 Perdas na colheita	21
4.4 Qualidade tecnológica da matéria-prima.....	23
4.5 Tendências da mecanização no setor canavieiro do Estado de São Paulo	26
4.6 Desempenho operacional do corte e carregamento mecanizado	28
4.7 Custos do corte e carregamento mecanizado.....	31
4.8 Problemas de programação linear.....	32
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
5.1 Fonte de dados	36
5.2 Método.....	37
5.2.1 Indicadores de desempenho operacional e econômico-Cenário Inicial (A).....	38
5.2.1.1 Custo horário de máquinas e implementos.....	49
5.2.1.2 Custos totais do corte e carregamento	55
5.2.2 Modelo matemático-Cenário Otimizado (B).....	56
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
6.1 Indicadores de desempenho operacional-Cenário inicial (A).....	59
6.2 Indicadores econômicos-Cenário inicial (A).....	64
6.3 Resolução do modelo matemático-Cenário otimizado (B).....	69
6.4 Indicadores de desempenho operacional-Cenário otimizado (B).....	74
6.5 Indicadores econômicos-Cenário otimizado (B)	75
7 CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE	90

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1. Participação das fontes de energia na oferta interna (%), Brasil 2001-2011..	11
Tabela 2. Oferta interna de energia em milhões de (tep), Brasil 2010-2011.....	12
Tabela 3. Produção por Estado da região Centro-Sul.....	13
Tabela 4. Informações tecnológicas sobre as variedades analisadas na safra 2011.	60
Tabela 5. Aproveitamento do tempo disponível pelas máquinas - Cenário inicial (A)..	60
Tabela 6. Dados para estimativa dos indicadores de desempenho operacional - Cenário inicial (A).....	61
Tabela 7. Indicadores de desempenho operacional - Cenário inicial (A).....	62
Tabela 8. Dados da Colhedora John Deere 3520.....	64
Tabela 9. Custo horário da colhedora - Cenário inicial (A).	65
Tabela 10. Indicadores econômicos de quatro colhedoras - Cenário inicial (A).....	65
Tabela 11. Dados do Trator Valtra BH 180.....	66
Tabela 12. Custo horário do trator - Cenário inicial (A).	66
Tabela 13. Dados do Transbordo de arrasto Antoniosi de 2 eixos.....	67
Tabela 14. Custo horário da carroceria - Cenário inicial (A).	67
Tabela 15. Indicadores econômicos de oito conjuntos de transbordo - Cenário inicial (A).....	67
Tabela 16. Produtividade ($t \cdot ha^{-1}$) das variedades de cana-de-açúcar do 1° ao 4° corte..	69
Tabela 17. Fibra (%) das variedades de cana-de-açúcar do 1° ao 4° corte.	70
Tabela 18. POL (%) das variedades de cana-de-açúcar do 1° ao 4° corte.	71
Tabela 19. Proposta de plantação de variedades - Cenário otimizado (B).....	72
Tabela 20. Dados para estimativa dos indicadores de desempenho operacional - Cenário otimizado (B).....	74
Tabela 21. Indicadores de desempenho operacional - Cenário otimizado (B).....	75
Tabela 22. Custo horário da colhedora - Cenário otimizado (B).....	76
Tabela 23. Indicadores econômicos de quatro colhedoras - Cenário otimizado (B).....	76
Tabela 24. Custo horário do trator - Cenário otimizado (B).	77
Tabela 25. Indicadores econômicos de oito conjuntos de transbordo - Cenário otimizado (B).....	78
Tabela 26. Comparativo dos indicadores de custos totais dos cenários (A) e (B).	78

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Fluxograma do sistema de colheita de cana-de-açúcar.	19
Figura 2. Área colhida de cana crua e queimada no Estado de São Paulo 2006-2011...	26

1 RESUMO

Nos últimos anos, diversos fatores afetaram a indústria canavieira do Brasil, como a queda na produtividade agrícola, baixa taxa de utilização da capacidade industrial e redução dos rendimentos dos processos agrícolas mecanizados, principalmente na colheita da cana-de-açúcar. O objetivo inicial deste estudo foi propor uma metodologia para a estimativa de indicadores de desempenho operacional e econômico para operações de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Objetivo principal foi o desenvolvimento de um modelo matemático para a maximização da produção, por meio da escolha de variedades de cana-de-açúcar mais produtivas e dentro dos parâmetros de qualidade da matéria-prima exigidos pela indústria. Com base no resultado do modelo matemático avaliou-se o impacto da maximização da produção sobre o custo operacional do subsistema de corte e carregamento da colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Os dados foram coletados por meio de pesquisa documental realizada numa propriedade pertencente a uma usina sucroenergética situada na região de Botucatu-SP. A metodologia deste trabalho foi dividida em duas etapas distintas. Na primeira etapa buscou-se analisar um cenário inicial (A) em que foram estimados indicadores de desempenho operacional e econômico, por meio de um estudo de caso, com a obtenção de informações sobre a área colhida na propriedade na safra 2011. Na segunda etapa foi projetado um cenário otimizado (B), que foi desenvolvido com a formulação de um modelo matemático para a maximização da produção da cana-de-açúcar na área estudada. Para a escolha das variedades mais produtivas foram coletadas informações sobre os indicadores de produtividade ($t\ ha^{-1}$), fibra (%) e POL (%), dos primeiros quatro anos de corte, no período de 2008 a 2012, de vinte e cinco variedades de cana-de-açúcar, dispostas em áreas próprias e arrendadas da

usina, as quais foram colhidas por meio de processos mecanizados. Utilizou-se a média, do primeiro ao quarto corte, dos indicadores das vinte e cinco variedades para a resolução do modelo proposto, o qual foi programado na plataforma GUSEK (GLPK *Under Scite Extended Kit*). Diante do cenário otimizado (B) foram estimados os indicadores de desempenho operacional e econômico com o intuito de validar o modelo matemático. Concluiu-se que o modelo matemático proposto contribuiu para a maximização da produção de cana-de-açúcar na área estudada em 17,25%, com a escolha das variedades mais produtivas e que atenderam aos padrões tecnológicos exigidos pela indústria. No cenário otimizado houve um aumento na capacidade de produção operacional das máquinas que realizam as operações de corte e carregamento diante do aumento da produção, isso contribuiu para uma redução de 12% no custo de produção operacional total do corte e carregamento por tonelada colhida.

Palavras-chave: Colheita mecanizada, custo operacional, modelo de otimização, programação linear inteira.

MATHEMATICAL MODELING FOR MAXIMIZING SUGARCANE (*Saccharum* spp.) PRODUCTION AND THE IMPACTS ON CUTTING AND LOADING MECHANIZED PRODUCTION COST. Botucatu, 2013. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: RICARDO GHANTOUS CERVI

Adviser: MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI

Co-Adviser: HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

2 SUMMARY

In recent years, several factors have affected the sugarcane industry in Brazil, as the drop in agricultural productivity, low rate of industrial capacity utilization and decrease in the yield of agricultural processes, especially in harvesting process. The initial objective of this study was to propose a methodology for the estimation of operational and economical performance indicators for mechanical harvesting of sugarcane operations. The main objective was to develop a mathematical model to maximize sugarcane yield choosing the most productive sugarcane varieties which are within the highest quality level required by industry. Based on mathematical model results it was evaluated the impact of maximizing production on cutting and loading subsystem operational costs of the mechanized harvesting process. Data were collected through desk research conducted in a sugarcane plant located in the region of Botucatu, São Paulo State. Methodology was divided into two distinct stages. In the first one, an initial scenario (A) was analyzed and operational and economical performance indicators were estimated within a study case which collected information on the harvesting area in 2011. The second stage, an optimized scenario (B), was developed by formulating a mathematical model for maximizing sugarcane production within the studied area. For choosing the most productive varieties data from twenty-five varieties of sugarcane were collected by means of mechanized processes indicating indexes of productivity ($t\ ha^{-1}$), fiber (%) and POL (%), along the first four years of cutting, from 2008 to 2012. Average of the indexes was used considering the first four cuts to solve the mathematical model programmed on GUSEK platform (GLPK Under Scite Extended Kit). Optimized scenario (B) enabled the estimation of operational and economical performance indicators in order to validate the proposed mathematical model. It was concluded that the proposed mathematical model

contributed to maximize the production of sugarcane yield chosen from the more productive varieties within the technological standards required by the industry. Results showed that in the optimized scenario the production increased in 17.25% and production capacity of operating machines which perform cutting and loading operations increased due to the increase on the production, thus contributing to reduction of 12% on the total operating costs per ton of cutting and loading process.

Keywords: Mechanical harvesting, operating costs, optimization modeling, integer linear programming.

3 INTRODUÇÃO

O segmento canavieiro na agroindústria brasileira é um dos mais antigos e de grande importância econômica para o país. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de álcool e o maior exportador mundial de açúcar. O segmento sucroalcooleiro assumiu, a partir dos anos 70, uma importância estratégica na economia brasileira deixando de ser exclusivamente voltado para o setor de alimentos, com a produção de álcool para uso como combustível sendo parte da política energética do governo, por meio do Programa Nacional do Álcool - PROÁLCOOL. Criado em 1975, o programa tinha como objetivo substituir parte da gasolina utilizada na frota nacional de veículos e com isso diminuir a dependência energética dos principais países produtores de petróleo, além de incluir o álcool anidro como aditivo à gasolina tornando menos poluente a sua combustão.

A cana-de-açúcar colhida no País, destinada ao setor sucroalcooleiro, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, ocupou uma área de 8,3 milhões de hectares, com uma produção total de 571,4 milhões de toneladas que foram industrializadas na safra 2011, o que resultou em 283,9 milhões de toneladas de açúcar e 22,8 milhões de metros cúbicos de álcool (BRASIL, 2011).

Para industrializar essa produção é necessário colher a matéria-prima no campo e transportá-la para a indústria. O sistema de colheita utilizado, até recentemente, foi o semimecanizado, com a queima prévia do canavial, corte manual e o carregamento da cana-de-açúcar inteira, realizado por meio de máquinas denominadas carregadoras. Contudo, o sistema de colheita apresentou muitas mudanças nos últimos anos, com a transferência do sistema semimecanizado para o mecanizado. No sistema

mecanizado são empregadas colhedoras autopropelidas que cortam, limpam e transferem a cana-de-açúcar para veículos de transbordo ou diretamente em veículos de transporte, como caminhões.

Essa mudança tem ocorrido por diversos fatores, dentre os quais se destacam: a redução de custos, diminuição da oferta de mão-de-obra, e, principalmente, pelo protocolo agroambiental proposto pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar – UNICA, em parceria com o Governo de São Paulo. O protocolo definiu algumas medidas, tal como a antecipação do prazo final para a eliminação da queima dos canaviais nos terrenos com declividade até 12% de 2021 para 2014 e em áreas não mecanizáveis até 2017 (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010).

A mecanização da colheita de cana-de-açúcar é inevitável porque uma colhedora de cana equivale a 100 cortadores, o que resulta em uma redução de 37% no custo de produção. Com isso, programas educacionais e de qualificação profissional são essenciais, assim como políticas públicas objetivas para minimizar os reflexos do êxodo rural que irá se acentuar nos próximos anos (COSTA NETO, 2006).

Realizar o planejamento e o controle das variáveis que afetam o sistema da colheita de cana-de-açúcar é um dos mais importantes passos no processo de produção da matéria-prima, porque impacta diretamente na qualidade e principalmente nos custos do uso da maquinaria envolvida.

Margarido e Santos (2013) destacam que o planejamento agrícola deve obedecer ao planejamento industrial para garantir fornecimento de matéria-prima para a indústria, o qual envolve, no caso da cultura da cana-de-açúcar, a produção agrícola, conservação e preparação do solo, plantio, tratamentos culturais da cana-planta, colheita, tratamentos culturais da cana-soca e o abastecimento da usina com matéria-prima durante o período de safra. Os autores também apontam que para obter êxito no abastecimento da indústria é necessário aplicar conceitos de logística em todo o canavial, observando-se o dimensionamento de máquinas e a disponibilidade de mão-de-obra.

O sistema de colheita deve ser planejado para manter um fluxo constante de matéria-prima para atender a demanda da indústria. Porém, as variáveis desse sistema se interrelacionam, o que significa que o desempenho de uma operação pode afetar outra e isso dificulta o processo de planejamento e gestão das operações de colheita.

Neste trabalho foi apresentada a hipótese que os custos das operações agrícolas mecanizadas na colheita da cana-de-açúcar podem ser reduzidos diante da maximização da produção do canavial.

O objetivo inicial deste estudo foi propor uma metodologia para a estimativa de indicadores de desempenho operacional e econômico para operações de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Objetivo principal foi o desenvolvimento de um modelo matemático para a maximização da produção, por meio da escolha de variedades de cana-de-açúcar mais produtivas e dentro dos parâmetros de qualidade da matéria-prima exigidos pela indústria. Com base no resultado do modelo matemático avaliou-se o impacto da maximização da produção sobre o custo operacional do subsistema de corte e carregamento da colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Breve histórico da cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar é uma planta proveniente do Sudeste Asiático que pertence ao gênero *Saccharum L.*. Toppa et al. (2010) apontam que existem pelo menos seis espécies do gênero, sendo que a cana-de-açúcar cultivada é um híbrido multiespecífico que recebe a designação *Saccharum spp.*

A produção de cana-de-açúcar no Brasil ocorreu no início do período colonial. Em 1532, Martim Afonso de Souza trouxe a primeira muda de cana-de-açúcar para o Brasil e iniciou seu cultivo na Capitania de São Vicente. Neste local, ele próprio construiu o primeiro engenho de açúcar. No entanto, foi no Nordeste, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar se multiplicaram. Em meados do século XVII, o Brasil tornou-se o maior produtor de açúcar do mundo, o qual era destinado principalmente ao abastecimento da Europa (MACHADO, 2003).

Os ciclos iniciais de expansão da cultura de cana-de-açúcar deixaram de herança o avanço da fronteira agrícola sobre áreas naturais, principalmente no bioma da Mata Atlântica, além da consolidação de relações de trabalho que em muito seguiram as tradições e injustiças do período colonial. As práticas agrícolas arcaicas também contribuíram para a expansão desordenada da cultura que resultou em graves impactos ambientais, como o desmatamento de matas nativas e a contaminação das águas (RODRIGUES; ORTIZ, 2006).

Os mesmos autores também descrevem que, no final do século XIX, após a abolição da escravidão, o governo brasileiro incentivou a vinda de europeus para suprir a mão-de-obra necessária às fazendas de café, no interior paulista. Os imigrantes, de maioria italiana, adquiriram terra e grande parte optou pela produção de aguardente a partir da cana-de-açúcar. Com isso, foram instalados vários engenhos, principalmente no Estado de São Paulo, nas regiões de Campinas, Itu, Moji-Guaçu e Piracicaba.

Segundo Machado (2003), na virada do século XX, a região de Piracicaba possuía três dos maiores Engenhos Centrais do estado e usinas como a Ester, a Santa Bárbara e a Monte Alegre, assim, tornou-se o maior centro produtor de açúcar do Estado de São Paulo. No início do século XX, impulsionados pelo crescimento da economia paulista, os engenhos de aguardente se transformaram em usinas de açúcar, dando origem aos grupos produtores mais tradicionais do Estado na atualidade.

O mesmo autor também aponta que, em 1910, Pedro Morganti, os irmãos Carbone e outros pequenos refinadores formaram a Companhia União dos Refinadores, uma das primeiras refinarias de grande porte do Brasil. Em 1920, Mário Dedini, um imigrante italiano com experiência em usinas de açúcar, fundou em Piracicaba uma oficina mecânica que logo depois se transformaria na primeira fábrica de equipamentos para a produção de açúcar no Brasil.

A década de 30 foi marcada pela disputa do mercado interno e pelo aumento da produção do açúcar nos estados de Rio de Janeiro e São Paulo em patamares superiores ao da região Nordeste, em especial Pernambuco. Com isso, surge o Instituto do Açúcar e Alcool - IAA, criado pelo governo Vargas em 1933, para a regulamentação do setor canavieiro.

O mecanismo de controle adotado pelo IAA foi o regime de cotas, em que se atribuía a cada usina brasileira uma determinada quantidade de cana-de-açúcar a ser moída, a produção de açúcar e também a de álcool, além disso, a aquisição de novos equipamentos ou a modificação dos existentes também tinha que ser autorizada por esse instituto. O IAA foi responsável por todas as políticas públicas, subsídios, comercialização interna e externa de cana-de-açúcar, açúcar e álcool por quase 60 anos (DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS, 2006).

Na década de 1970 surgiu um novo ciclo do setor canavieiro no Brasil, com o Programa Nacional do Alcool- PROÁLCOOL. Esse programa proporcionou melhorias tecnológicas nas usinas e destilarias, além de um importante desenvolvimento na indústria automobilística nacional.

A adoção do PROÁLCOOL diminuiu o poder de intervenção do IAA, que passou a funcionar apenas como uma assessoria técnica do programa. No início da década de 90 o IAA foi extinto, por meio de uma reforma administrativa do Governo Federal. Dessa maneira, o setor sucroalcooleiro passou a funcionar com pouca intervenção estatal. No entanto, ao longo da década de 90, várias iniciativas beneficiaram os usineiros, como a substituição do IAA por Secretarias de Desenvolvimento Regionais, liberação de linhas de crédito, autorização para abertura de novas unidades, e o fim do monopólio estatal das exportações em período de alta de preços do açúcar no mercado internacional (DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS, 2006).

Informações da mesma fonte apontam que, no final da década de 90, o governo criou o Conselho Interministerial do Alcool, o qual proporcionou ações pontuais que beneficiaram o setor sucroalcooleiro, como a ampliação das linhas de financiamento para a negociação de dívidas e a aprovação da cota de vinte e cinco por cento de álcool etílico anidro à gasolina.

4.2 Participação dos produtos da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira

O Brasil é um país que apresenta uma configuração privilegiada da matriz energética em termos de uso de fontes renováveis de energia, uma vez que 44,1% do consumo energético, em 2011, foi atendido por fontes renováveis, muito acima da média mundial, de 13,3% (BRASIL, 2012b).

Essa característica resulta do grande desenvolvimento do parque gerador de energia hidrelétrica desde a década de 50 e de políticas públicas adotadas após as crises do petróleo, ocorridas na década de 70, visando à redução do consumo de combustíveis fósseis dos principais países produtores. Com isso, implantou-se o PROÁLCOOL, o qual tinha como objetivo substituir parte da gasolina utilizada na frota nacional de veículos pelo uso de álcool hidratado e como aditivo à gasolina, o álcool anidro, tornando menos poluente a sua combustão.

Com a criação do PROÁLCOOL, como instrumento essencial da política energética estabelecida no Brasil, o papel do álcool deixava de ser apenas uma válvula de escape da indústria açucareira, além de ser uma fonte renovável de energia. Também se tornou um meio para reduzir o impacto do choque do petróleo sobre a balança comercial e para reduzir a dependência energética do exterior (CORREIA, 2007).

A adição de etanol à gasolina trouxe imediatamente reduções da ordem de 50% na emissão de CO (Monóxido de Carbono), segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. Há uma tendência mundial para a adição de compostos oxigenados à gasolina, visando à redução do impacto poluidor. É importante salientar que o Brasil conta com uma frota veicular do tipo “*flexfuel*” (bi-combustível) que utiliza etanol em larga escala como combustível (SÃO PAULO, 2008).

Meneguello e Castro (2007) apontam que o Brasil se destaca como um modelo mundial pelo seu vigoroso programa de biocombustíveis no setor de transportes baseado no etanol, e, também, pela aplicação das tecnologias de energia da biomassa. Bons exemplos disso são: a produção do etanol a partir da cana-de-açúcar, o carvão vegetal oriundo de plantações de eucaliptos, a cogeração de energia com o bagaço de cana-de-açúcar e o uso da biomassa em indústrias de papel e celulose tais como: cascas e resíduos de árvores, serragem e licor negro.

A participação na oferta interna de energia do país, em 2011, provinda de produtos da cana-de-açúcar foi de 15,7%, representando o maior percentual na oferta de energia oriunda de fontes renováveis, seguida pela energia hidráulica com 14,7%, lenha e carvão vegetal com 9,7% e outras fontes 4,1% (Tabela 1).

Tabela 1. Participação das fontes de energia na oferta interna (%), Brasil 2001-2011.

Ano	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
FONTE NÃO RENOVÁVEL	60,7	58,8	56,3	56,2	55,5	55,0	54,3	54,1	52,8	54,9	55,9
Petróleo e Derivados	45,4	43,0	40,1	39,1	38,7	37,8	37,5	36,6	37,9	37,8	38,6
Gás natural	6,5	7,4	7,7	8,9	9,4	9,6	9,3	10,3	8,7	10,2	10,1
Carvão mineral e derivados	6,9	6,5	6,7	6,7	6,3	6,0	6,0	5,8	4,7	5,4	5,6
Urânio (U ₃ O ₈) e derivados	2,0	1,9	1,8	1,5	1,2	1,6	1,4	1,5	1,4	1,4	1,5

FONTE RENOVÁVEL	39,3	41,2	43,7	43,8	44,5	45,0	45,7	45,9	47,2	45,1	44,1
Energia hidráulica e eletricidade	13,6	14,0	14,6	14,4	14,8	14,8	14,9	14,0	15,2	14,0	14,7
Lenha e carvão vegetal	11,6	11,9	12,9	13,2	13,0	12,6	12,0	11,6	10,1	9,7	9,7
Produtos da cana-de-açúcar	11,8	12,8	13,4	13,5	13,8	14,6	15,9	17,0	18,2	17,5	15,7
Outras renováveis	2,4	2,5	2,8	2,7	2,9	3,0	2,9	3,4	3,8	3,9	4,1

Fonte: (BRASIL, 2012b).

Por outro lado verifica-se, conforme dados da Tabela 1, que, em 2009, o país chegou a ter 47,2% de energias renováveis na oferta interna de energia e que nos anos de 2010 e 2011 houve uma redução na participação das energias renováveis na matriz energética brasileira como consequência, principalmente, da diminuição na oferta da biomassa de cana-de-açúcar.

Conforme os dados da Tabela 2, pode-se verificar que, de 2010 para 2011, houve uma redução de 9,2% na oferta interna de energia oriunda de produtos da cana-de-açúcar, em milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep).

Tabela 2. Oferta interna de energia em milhões de (tep), Brasil 2010-2011.

Ano	2010	2011	Variação(%)	Ano	2010	2011	Variação(%)
FONTE RENOVÁVEL	121,2	120,2	-0,9	FONTE NÃO RENOVÁVEL	147,6	152,2	3,1
Energia hidráulica e Eletricidade	37,7	39,9	6,1	Petróleo e derivados	101,7	105,2	3,4
Lenha e carvão vegetal	26,0	26,3	1,3	Gás natural	27,5	27,6	0,2
Produtos da cana-de-açúcar	47,1	42,8	-9,2	Carvão mineral e derivados	14,5	15,2	5,4
Outras renováveis	10,4	11,1	6,4	Urânio (U ₃ O ₈) e derivados	3,9	4,1	7,4

Fonte: (BRASIL, 2012b).

Essa redução pode ser justificada, porque a safra 2010/11, de acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), apresentou diversos pontos desfavoráveis como a queda na produtividade agrícola, redução no teor de açúcar total recuperável da cana, baixa taxa de utilização da capacidade industrial e

redução dos rendimentos dos processos agrícolas mecanizados, principalmente no corte da cana-de-açúcar. Isso ocasionou um significativo aumento dos custos agroindustriais por unidade de produto, uma vez que a produção de uma usina típica da região Centro-Sul foi 16% menor que nas safras anteriores, e como consequência houve um aumento nos preços do açúcar e do etanol (BRASIL, 2012a).

4.3 Caracterização da produção de cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima para a fabricação de açúcar e etanol no Brasil, além de ser uma das culturas agrícolas mais tradicionais e importantes do País, pois gera centenas de milhares de empregos diretos e indiretos. É fonte de renda e desenvolvimento, mas historicamente apresenta-se como grande concentradora de renda.

O cultivo da cana-de-açúcar, para produção industrial ocorre basicamente nas regiões Centro-Sul e Nordeste do país, sendo São Paulo o principal Estado produtor. Na safra 2009/10, conforme Tabela 3, este Estado produziu 361,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010).

Tabela 3. Produção por Estado da região Centro-Sul.

Safra 2009/10	Cana-de-açúcar (toneladas)	Açúcar (toneladas)	Etanol total (m ³)	Etanol anidro (m ³)	Etanol hidratado (m ³)
ES	4.009.626	77.685	238.037	111.788	126.249
GO	40.075.735	1.384.143	2.196.205	484.689	1.711.516
MT	14.045.632	414.223	826.040	265.976	560.064
MS	23.111.237	746.772	1.261.407	234.698	1.026.709
MG	50.573.227	2.685.317	2.251.446	496.197	1.755.249
PR	45.578.529	2.430.692	1.884.596	377.243	1.507.353
RJ	3.258.726	176.638	113.124	9.962	103.162
RS	48.346	0	2.457	0	2.457
SP	361.260.727	20.729.364	14.912.442	4.225.762	10.686.680
TOTAL	541.961.785	28.644.834	23.685.754	6.206.315	17.479.439

Fonte: (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2010).

O Estado de São Paulo é responsável por cerca de 60% da produção de etanol e açúcar do Brasil. Em termos de produção de cana, equivale a 83% da produção do segundo maior produtor mundial, a Índia, e também representa uma produção maior do que os outros quatro grandes produtores mundiais combinadas (China, Tailândia,

Paquistão e México). Para atender à crescente demanda interna por etanol, devido ao aumento recente e substancial da frota de veículos bi-combustível, novas áreas de cana-de-açúcar foram cultivadas em grande escala. Nas safras de 2006/07 e 2007/08, o cultivo em novas áreas chegou a 1,55 milhões de hectares na região Centro-Sul do Brasil (RUDORFF et al., 2010).

Os mesmos autores também relataram que o Brasil poderia se tornar um grande exportador de etanol, se cumprisse as exigências impostas pelas certificações socioambientais dos países importadores. No entanto, para obter estas certificações, o Brasil deve cumprir alguns critérios, tais como: a não substituição das áreas designadas para a produção de alimentos e conservação da biodiversidade com a cana-de-açúcar, e a eliminação da prática da queima da palha antes da colheita.

Foi assinado, em 2007, um protocolo de cooperação entre o governo e o setor sucroalcooleiro visando consolidar o desenvolvimento sustentável da indústria da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Esse Protocolo, de adesão voluntária, estabeleceu uma série de princípios e diretrizes técnicas a serem observadas pelos produtores e indústrias da cana-de-açúcar.

O acordo teve como objetivo antecipar, nos terrenos com declividade até 12%, o prazo final para a eliminação da queima da cana-de-açúcar de 2021 para 2014. Já para terrenos com declividade superior a 12%, considerados não mecanizáveis, o prazo final passa de 2031 para 2017. Como resultado, a adesão ao protocolo de cooperação confere aos produtores um Certificado de Conformidade Agroambiental, que proporciona vantagens importantes nos procedimentos de certificação de seus produtos para exportação (NOVAES et al., 2011).

4.3.1 Processos agrícolas na produção de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma planta da família das gramíneas com ciclo fotossintético C4, a qual apresenta uma produção crescente com a incidência de maior radiação solar desde que a disponibilidade de água, nutrientes minerais e a concentração de O₂ (oxigênio) e CO₂ (dióxido de carbono) na atmosfera não sejam limitantes. Portanto, é uma planta indicada para regiões tropicais. Também é muito eficiente na fixação do CO₂, o que contribui com a redução do aquecimento global. No

Brasil, a cana-de-açúcar encontra condições climáticas favoráveis para se desenvolver em quase todo território, exceto nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, por causa do risco de geadas. No entanto, para responder com produtividade alta, a cana-de-açúcar necessita de solos corrigidos e equilibrados (CASAGRANDE, 1991; CAMARA; OLIVEIRA, 1993).

Marques (2009) diz que a planta pode ser dividida em duas partes: aérea e subterrânea, sendo a parte aérea composta por colmos, folhas, inflorescências e frutos, e a parte subterrânea, composta por raízes e rizomas.

O mesmo autor também destaca que do colmo é extraída a sacarose, água e o bagaço. Dessa maneira, da sacarose, são produzidos o açúcar e o álcool e, com a queima do bagaço, são geradas energia térmica e elétrica nas usinas. As folhas são geralmente queimadas, quando se utiliza o corte manual, mas, quando há o corte da cana-de-açúcar crua, sem queima prévia, as folhas são depositadas no solo ou também são coletadas para serem queimadas juntamente com o bagaço, o que aumenta o aproveitamento da biomassa disponível para a cogeração de energia. A parte subterrânea é mantida no solo para rebrotar por 4 a 6 ciclos, dependendo do tipo de manejo utilizado.

Barbieri e Villa Nova (1977) apontaram que, na região centro-sul, o plantio da cana-de-açúcar é feito em duas épocas, conhecidas como “plantio de cana de ano” e “plantio de cana de ano e meio”. O plantio feito em setembro-outubro permite a colheita da cana-de-açúcar com aproximadamente 11 a 14 meses, e é conhecida como “cana-de-ano”. O plantio feito em janeiro-março permite a colheita da cana-de-açúcar com aproximadamente 15 a 20 meses, e é conhecida como “cana de ano e meio”. Depois da primeira colheita, as soqueiras são anualmente colhidas durante um período de 5 a 6 anos. No entanto, colheitas sucessivas levam a uma perda gradual de rendimento até a colheita já não ser economicamente viável. Neste ponto, o ciclo é interrompido e a área é renovada.

No decorrer das últimas décadas, a atividade canavieira apresentou mudanças extraordinárias na evolução dos processos de produção, quanto ao preparo do solo, tratos culturais, plantio e colheita, destacando-se, mais recentemente, o grande avanço na sistematização do plantio e da colheita através da mecanização, o que resultou no melhor aproveitamento da terra e maior produtividade, com ganhos econômicos e ambientais. Assim, para adotar a mecanização da cultura de cana-de-açúcar, o produtor deve fazer a sistematização dos canaviais (REIS, 2009).

4.3.1.1 Preparo do solo

As operações realizadas no preparo do solo de canaviais são: aração, calagem, confecção de terraços, dessecação para plantio, gessagem, gradagem niveladora, manutenção de estradas e carreadores, além da sistematização do terreno e subsolagem. Marques (2009) diz que estas operações não apresentam um padrão definido devido à influência de vários fatores como: declividade do terreno, tipo de solo, regime de chuvas, tipo e disponibilidade de máquinas e implementos, e suscetibilidade à erosão.

De acordo com Geraldi (2007), para realizar a sistematização dos canaviais é necessário fazer o preparo do solo que é desenvolvido por meio do nivelamento do solo com eliminação de sulcos de erosões, barrancos, pedras, tocos e raízes. Além da construção de terraços embutidos ou de base larga e sulcação. O autor destaca que é necessário deixar um espaçamento mínimo de 1,50 metros entre as linhas de cana-de-açúcar com sulcos regulares e não muito profundos. É necessário também evitar ruas desnecessárias dentro do talhão e dimensionar talhões para evitar o excesso de manobras das máquinas.

Segundo Gazon (2009), ao sistematizar o talhão de cana-de-açúcar é possível otimizar o plantio e a colheita mecanizada, o que implica em aumento no rendimento operacional e redução de custos. Para alcançar esse alto rendimento operacional e um melhor ganho econômico, a orientação é mudar o traçado dos talhões, colocando o menor número possível de linhas curtas e bicos. Para isso, o primeiro passo é conhecer muito bem a área a ser sistematizada e, respeitando o período chuvoso, iniciar um trabalho de substituição dos terraços por outro tipo de controle de erosão.

4.3.1.2 Plantio

Ripoli e Ripoli (2010) relatam que o sistema de plantio mais utilizado no Brasil é o semimecanizado através da sulcação mecânica, distribuição e picamento manual das mudas e cobertura de sulco com máquina. No entanto, a escassez e o custo da mão-de-obra têm aumentado o que resulta na necessidade de mecanização total da operação. Os autores também relataram neste estudo que, em termos de custos efetivos,

o sistema mecanizado é significativamente mais barato do que o semimecanizado, independentemente dos tipos de plantadoras disponíveis no mercado.

Na maioria dos casos, o plantio mecanizado é feito com mudas picadas após a colheita mecânica. Assim, as máquinas são adaptadas, quando se faz o “emborrachamento” ou proteção dos principais pontos de atrito, evitando a danificação das gemas e toletes, que têm de 25 a 40 centímetros de comprimento. As mudas são depositadas em transbordos para então serem transportadas para a área de plantio. Assim, são necessárias plantadoras, que foram desenvolvidas para tal, que sulcam, depositam o adubo, as mudas e, se for necessário, inseticidas, para depois cobrirem numa só operação. A qualificação da mão-de-obra é importante para o sucesso do plantio, uma vez que as mudas não podem ter danos significativos nas gemas e toletes (NOGUEIRA; ROSSINI, 2010).

Estes autores também destacam que diversos fatores influenciam o plantio mecanizado, como: variedade da cana; idade da muda; tamanho do tolete; temperatura; umidade; preparo do solo; quantidade de terra sobre a muda; tempo de exposição; distância entre as mudas; relevo da área e posicionamento do talhão.

Reis (2009) aponta que o sucesso da colheita mecanizada da cana-de-açúcar também depende do plantio de qualidade, sem falhas no estande, com paralelismo entre sulcos e suavidade do microrrelevo do solo. Isso poderá proporcionar menores perdas quantitativas no processo. Assim, no plantio de cana-de-açúcar, independentemente do método empregado, semimecanizado ou mecanizado, as necessidades da cultura deverão ser atendidas, uma vez que as atitudes tomadas na operação de plantio são determinantes na produtividade, longevidade do canavial e principalmente na operação de colheita.

Percebe-se que o plantio e a colheita são correlacionados e que existe uma forte tendência para a mecanização do plantio da cana-de-açúcar, justificada pelo menor custo da operação e um melhor desempenho operacional das plantadoras disponíveis no mercado.

4.3.1.3 Tratos culturais

Os tratos culturais na produção canavieira têm como objetivo prover melhores condições para o desenvolvimento da cultura que se baseiam no trinômio:

planta, ambiente e manejo. Entre as atividades desta etapa destacam-se: adubações de cobertura, irrigação e aplicação de defensivos químicos e biológicos, além da aplicação de corretivos, como calcário e gesso (MARQUES, 2009).

Urquiaga et al. (1991) verificaram que existem vantagens na manutenção da palha na colheita da cana-de-açúcar. O estudo apontou que a palha que cobre o solo se degrada ao longo dos ciclos da cultura, e isso contribui para a conservação de nutrientes, especialmente nitrogênio e enxofre. Assim, reduz significativamente o uso de herbicidas, que, em contrapartida, na cultura com queima é prática obrigatória, além de proteger os organismos controladores biológicos de pragas e doenças. Esta prática também favorece para a infiltração da água no solo, e, conseqüentemente, diminui o escoamento superficial e a erosão, especialmente em áreas de maior inclinação.

Ripoli, Molina Júnior e Ripoli, (2000) também descreveram que no manejo de um canavial sem despalha a fogo, a quantidade de matéria orgânica incorporada ao solo é consideravelmente maior do que aquela no manejo com queima, ou mesmo sem a queima, mas com remoção da palha para aproveitamento como fonte de energia. Isso demonstra que a colheita de cana crua é favorável para os processos de tratos culturais, além de contribuir significativamente para a diminuição de custos com defensivos e fertilizantes.

4.3.1.4 Colheita

Para a seleção de um sistema de colheita, a análise não deve se limitar a aspectos relacionados somente à máquina ou à mão-de-obra envolvida, e sim se deve considerar os fatores fisiológicos, sociais, tecnológicos e econômicos. Para o caso específico da cana-de-açúcar, a colheita da matéria-prima, que é constituída de colmos industrializáveis, brotos, matéria estranha mineral e vegetal, deve refletir todo trabalho desenvolvido no planejamento e na implantação da cultura, desde o preparo do solo até a operação de colheita (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

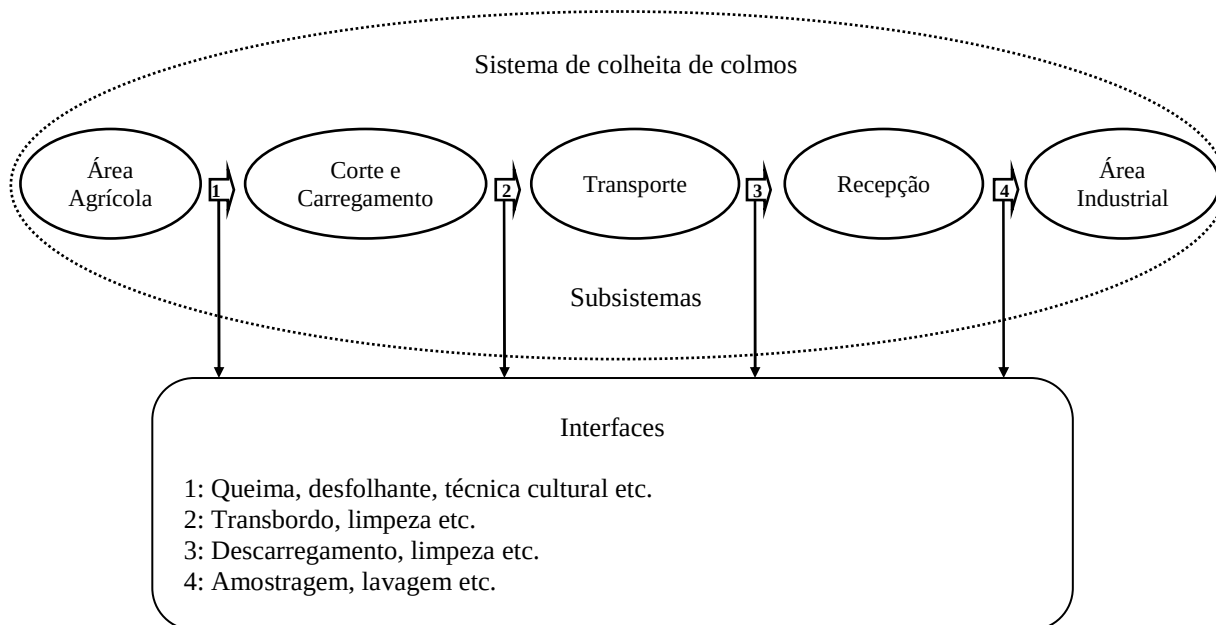


Figura 1. Fluxograma do sistema de colheita de cana-de-açúcar.

Fonte: Adaptado de Mialhe e Ripoli (1976).

Como pode ser observado na Figura 1, o sistema de colheita é composto por três subsistemas: corte e carregamento, transporte e recepção. Ripoli e Paranhos (1987) descreveram que cada subsistema tem interfaces que incluem aspectos comuns, os quais estabelecem um fluxo da matéria-prima do campo à indústria e que precisam ser estruturados de acordo com o arranjo técnico empregado.

Ripoli e Ripoli (2009) descreveram que o subsistema de corte e carregamento utilizado no Brasil, e inclusive no mundo, pode ser subdividido em três grupos: manual, semimecanizado e mecanizado. Com o corte manual, com ou sem a queima da palha, pode haver ainda sistemas de transporte intermediário por tração animal ou transbordo com dispositivos específicos. Contudo, os autores destacaram que, apesar de ser nitidamente um sistema antiquado, é utilizado ainda em grande escala, principalmente no Nordeste Brasileiro e em regiões com muito declive. Com o corte semimecanizado, a colheita é realizada manualmente e o carregamento é realizado mecanicamente, por carregadoras mecânicas, nas unidades de transporte. Os autores relataram que este sistema é amplamente utilizado em várias regiões canavieiras do Brasil em locais onde o relevo não ultrapassa 20 a 25% de declividade.

Os mesmos autores também descreveram que, com a colheita mecanizada, utilizam-se colhedoras de cana inteira com carregamento mecânico, ou então,

através de colhedoras que cortam, picam, limpam parcialmente a matéria-prima e a carregam em unidades de transporte. A utilização da colheita mecanizada é admitida em relevos de 15 a 17% de declividade. No entanto, depende da qualidade da sistematização do talhão e do centro de gravidade das máquinas.

Rodrigues e Abi Saab (2007) destacaram que a mudança na etapa do corte, de manual para mecânico, não é apenas uma mera substituição de uma técnica por outra, porque, em termos agrícolas, isto significa combinar e otimizar aspectos como: o preparo do solo na lavoura, o dimensionamento dos equipamentos no campo, a equipe de manutenção e apoio, o treinamento do pessoal envolvido, além das alterações no transporte e recepção da cana na indústria.

Ustulin e Severo (2001) descreveram que, enquanto um trabalhador braçal colhe, em média, 6 t dia⁻¹ de cana, a máquina pode atingir até 600 t dia⁻¹. Dessa maneira, 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 apresentar compatibilização com o ritmo da indústria.

A economia do emprego de colhedoras autopropelidas de cana-de-açúcar não está apenas na mecanização da operação do corte, mas também na substituição das operações seguintes: fracionamento, limpeza e carregamento, além de outras características como a diminuição do trânsito de veículos pesados sobre o solo agrícola, o que diminui a compactação do solo, e a dinâmica de integração com o sistema de transbordo, transporte e descarregamento na unidade de processamento (GONÇALVES, 2005).

Com a implantação da mecanização do corte de cana, além de aquisições de colhedoras, existe também a necessidade de modificar as unidades de transporte, com a introdução de transbordo intermediário. A operação de transbordo é a atividade de transferir a matéria-prima existente em um tipo de veículo de transporte para outro. O transbordo é utilizado em sistemas de colheita que utilizam colhedoras autopropelidas, em que os colmos são picados e, assim, as colhedoras são acompanhadas de carretas tracionadas por tratores de rodas. Assim, a adequação do conjunto de transbordo, trator e implemento, é determinada pelo tipo e condição de solo e pelo número de operações efetuadas (CORRÊA, 2006).

Com o desenvolvimento tecnológico das máquinas, adaptação dos canaviais e escolha de variedades de cana-de-açúcar propícias para o corte mecanizado, os custos operacionais foram diminuindo com o passar dos anos. No entanto, o plantio em terrenos com elevada declividade e o uso de variedades de cana-de-açúcar que não são favoráveis à colheita mecanizada podem tornar o processo mecanizado inviável.

A prática da pré-limpeza da cana-de-açúcar com fogo deve ser eliminada nos próximos anos. Desse modo, o planejamento da colheita para adoção de processos mecanizados é importante para assegurar o melhor rendimento agrícola, porque dele depende o fomento da indústria e a garantia da máxima qualidade do canavial (MARGARIDO; SANTOS, 2013).

4.3.1.5 Perdas na colheita

As perdas na colheita são indesejáveis, tanto na operação manual quanto na mecanizada, sendo discutidas a redução de prejuízos e a otimização da produção. As perdas e a contaminação da cana-de-açúcar com terra durante o processo de colheita estão associadas diretamente ao descompasso com o microrrelevo do solo e da varredura ineficiente realizada pelo cortador basal (OLIVEIRA, 2010).

Rosa e Carvalho (2010) descreveram que o corte de base é um dos itens de maior importância em uma colhedora de cana-de-açúcar, pois está diretamente ligado à qualidade da matéria-prima e aos níveis de perda na colheita, principalmente quando se levam em conta os modelos dos discos de corte de base e a forma das facas. Atualmente, as facas lisas são utilizadas em larga escala pelas Usinas e, ao cortar a cana-de-açúcar em sua base por impacto, essas peças contaminam a matéria-prima, provocam perdas de colmos e abalo da soqueira. Uma das consequências é o comprometimento da rebrota seguinte, o que reduz a produtividade e longevidade do canavial.

De acordo com Ripoli e Ripoli (2009), as perdas podem ser divididas em visíveis e invisíveis. As perdas são denominadas visíveis quando podem ser detectadas visualmente e que representam a massa industrializável, isto é, conteúdo que fica no campo após a passagem da máquina, as quais constituem-se principalmente de canas inteiras, rebolos e tocos resultantes da altura do corte basal. As perdas invisíveis são decorrentes do processamento da cana-de-açúcar através de mecanismos rotativos de corte e limpeza, na forma de caldo, serragem e estilhaços de cana-de-açúcar.

Os mesmos autores apontam que as colhedoras autopropelidas, que picam os colmos em rebolos, devem apresentar uma frequência de comprimento menor possível para que haja um sincronismo dos mecanismos de corte e condução da máquina. O tamanho dos rebolos irá refletir na densidade da carga, no transporte e na velocidade de deterioração da matéria-prima. Quanto menores forem os rebolos, maiores densidades de carga serão obtidas, mas isso aumenta a possibilidade de deterioração da matéria-prima, como consequência, maiores perdas invisíveis ocorrerão.

Outros estudos também apontaram que o tamanho de rebolos tem influência na qualidade da matéria-prima. Isso se relaciona com o processo de deterioração da cana, com perdas invisíveis, além da densidade de carga no transbordo e no veículo de transporte. Assim, a padronização do rebolo influencia na qualidade e, também, no custo da matéria-prima. A colheita mecanizada de cana-de-açúcar deve atender às exigências de qualidade da moagem no que se refere ao tamanho de rebolo e que a colheita mecanizada da cana crua apresenta uma menor variação no padrão dos rebolos quando comparada com a mesma operação em cana queimada (PELOIA; MILAN; ROMANELLI, 2010).

Viator et al. (2007) analisaram o efeito combinado da característica do terreno, velocidades de operação de colhedoras de cana, qualidade da matéria-prima e perdas no processo. Os autores apontaram que, com o aumento da velocidade de deslocamento da colhedora, as perdas também aumentam. Também destacaram que outra variável que impacta nas perdas da colheita é a variedade de cana utilizada, assim, relataram que variedades com um diâmetro de caule pequeno e folha estreita apresentam dificuldades na remoção de matéria estranha vegetal e mineral nas colhedoras, o que diminui a eficiência no processo de colheita.

No Estado de São Paulo, as colhedoras de cana trabalham com velocidades de 4 até 6 km h⁻¹, devido à falta de sistematização dos talhões voltada para colheita mecânica. Maiores velocidades em talhões não sistematizados para a colheita mecanizada, principalmente no que se refere à condição da soqueira, inevitavelmente levam a maiores perdas de matéria-prima. Assim, a velocidade deve ser ajustada em função das características do talhão no que diz respeito à sistematização, porte do canavial e a produtividade agrícola estimada (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

Para Magalhães, Baldo e Cerri (2008), a concorrência do mercado com a crescente demanda de cana-de-açúcar faz com que o setor agrícola busque cada vez

mais equipamentos com maior eficiência e tecnologia, para que, dessa forma, possa proporcionar menor perda e maior qualidade da matéria-prima colhida, a fim de maximizar a lucratividade. Os autores desenvolveram um sistema de sincronismo, com o objetivo de controlar a colhedora de cana e o transbordo, a fim de evitar perdas com a cana colhida, aumentar a capacidade operacional, e melhorar a eficiência de campo do conjunto mecanizado. Por fim, concluíram que o sistema de sincronismo diminuiu as perdas em torno de $0,6 \text{ t ha}^{-1}$, isso equivale na redução de perdas de rebolos de 8,16%, quando comparado ao sistema de sincronismo desativado.

4.4 Qualidade tecnológica da matéria-prima

Por apresentar um ciclo semiperene, a cana-de-açúcar é influenciada por variações climáticas durante o ano, o que pode refletir na produção e maturação da cultura. Para obter índices de produção satisfatórios, a cultura necessita de um período quente e úmido, com intensa radiação solar durante a fase vegetativa, seguido de um período seco na fase de maturação e colheita (ALFONSI et al.,1987).

A qualidade da matéria-prima encontra-se diretamente relacionada com o desempenho dos processos agrícolas e industriais. A matéria-prima de baixa qualidade reduz a velocidade de processamento na indústria, e consequentemente, reduz a quantidade e qualidade dos produtos finais (CLARKE; LEGENDRE, 1999).

Segundo Stupiello (1989), a cana-de-açúcar como matéria-prima, significa colmos maduros, recém-cortados, sadios e livres de impureza. Contudo, todos os fatores que danificam as raízes, os colmos e as folhas da cana, como ataques de pragas, doenças e falhas em fatores ligados ao seu manejo são indesejáveis, porque diminuem a sua qualidade e podem acarretar em prejuízos tanto no rendimento agrícola como industrial. O autor também apontou que os atributos que devem ser considerados para a qualidade da cana-de-açúcar são o POL da cana, BRIX do caldo e quantidade de fibra na cana.

Para Brieger (1968), a cana-de-açúcar é considerada madura, para início de safra, quando atinge os seguintes valores mínimos: BRIX (sólidos solúveis) 18° ; POL caldo de 15,3% ou POL cana de 13,0%; pureza 85% e açúcares redutores de 1%, no máximo. Para o final da safra, considera-se que cana deve apresentar, no mínimo, 16% de POL cana.

Stupiello (1987) definiu POL como a quantidade em peso da sacarose em 100 ml de solução, medida pelo desvio ótico provocado pela solução, no plano de uma luz polarizada. O termo POL (%) de caldo é usado, quando a análise é feita na amostra de caldo após a extração, e POL (%) de cana, quando a análise é feita na amostra de colmos desintegrados.

Outros estudos apontam que as cultivares de cana-de-açúcar utilizadas, na região Centro-Sul do Brasil, conforme os seus comportamentos de maturação, são agrupadas em: precoces, quando apresentam um teor de POL acima de 13% no início de maio; médias, quando atingem a maturação em julho; e tardias, com pico de maturação em agosto ou setembro (HORII, 2004).

Lavanholi (2008) diz que a “cana-padrão”, em condições tecnológicas e econômicas de processamento industrial, deve apresentar o teor de sacarose (POL% cana) de aproximadamente 12,5%. O autor também descreve que os níveis de fibra dos colmos de cana-de-açúcar devem estar no intervalo de 8 a 14%.

Para Ripoli e Ripoli (2009), as variedades são consideradas muito produtivas, quando POL da cana-de-açúcar é maior que 14%, médias com POL entre 12,5% e 14% e pouco produtivas com POL menor que 12,5%.

Lopes (1986) relatou que BRIX é a porcentagem, em peso, de sólidos solúveis aparentes contidos no caldo de cana. Entre os sólidos solúveis, destacam-se em importância e em quantidade, os açúcares. Entre estes, a glicose e a frutose, por apresentarem a propriedade de reduzir, em meio alcalino e em alta temperatura, os íons cúpricos (Cu_2^+) em cuprosos (Cu^+), estes são conhecidos como açúcares redutores. Dessa maneira, o processo de maturação da cana consiste em um acúmulo de sacarose que ocorre concomitantemente com uma redução do teor de açúcares redutores e aumento da pureza. Assim, quando a umidade da cana diminui, o teor de fibra aumenta à medida que aumentam a POL, o BRIX e a pureza, e diminui o teor de açúcares redutores, ou seja, isso ocorre na medida em que a cana torna-se mais madura.

Segundo Orlando Filho et al. (1996), quanto maior o teor de água na planta, menores são as porcentagens de fibra na cana. A avaliação do teor de fibra entre variedades é uma característica genética. Quando maior o teor de sacarose das variedades, característica que tem sido baseada pelos programas de melhoramento, menor é o teor de fibra apresentado por elas.

Os mesmos autores descreveram que o teor de fibra é uma característica varietal de muita importância para a geração de energia e recomendam variedades que não superem 10,5% de fibra. Por fim, concluem que fatores como: solo, umidade, idade ou tipo de corte, exercem grande influência na formação das partes moles (75% do colmo, com 8% de fibra e 80% do caldo) e das partes duras (25% do colmo, com 75% de fibra e 75% do caldo).

Gravois e Milligan (1992) relataram que a quantidade de fibra na cana-de-açúcar influencia diretamente no processo de moagem, porque a fibra é utilizada para a produção de energia com sua queima nas caldeiras e uma porcentagem muito baixa de fibras proporciona um menor rendimento das caldeiras e, conseqüentemente, maiores custos de produção de energia elétrica para a usina. Em contrapartida, uma maior porcentagem de fibra significa uma menor quantidade de caldo extraído e, assim, uma menor produção de açúcar.

Os avanços tecnológicos desempenham um papel importante no desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Gouvêa et al. (2009) relataram que o melhoramento genético da planta, associado a melhores práticas de gestão, é responsável por um aumento na produtividade de 0,43 t ha⁻¹ por ano. Os autores apresentaram uma previsão de rendimento adicional na produção de 6, 19 e 32 t ha⁻¹ para 2020, 2050 e 2080, respectivamente. Isso representa aproximadamente 35, 51 e 61% do respectivo aumento total no potencial geral de produtividade das culturas. Os autores concluíram que esses fatores podem levar a uma otimização do uso do solo, ou seja, uma produção mais elevada em áreas menores.

Barbosa (2013) aponta que, no Brasil, o melhoramento genético da cana-de-açúcar é realizado pelas seguintes instituições: Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, que produz as variedades denominadas IACs; Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro - RIDESA, com as variedades RBs; Centro de Tecnologia Canavieira - CTC, com as variedades CTCs e as antigas SPs; e a empresa CANAVIALIS, com as variedades CVs.

4.5 Tendências da mecanização no setor canavieiro do Estado de São Paulo

Conforme dados da Figura 2, percebe-se que sobre o total de cana-de-açúcar colhida no Estado de São Paulo em 2008, 49% (1,9 milhões de hectares) foi sem práticas de queima da palha, e 51% (2 milhões de hectares) foi com a prática de palha queimada antes da colheita. Isso indica que as práticas de queima ainda são amplamente usadas no Estado de São Paulo. No entanto, pode-se notar que, a partir de 2009, a área colhida de cana-de-açúcar crua, sem a queima, foi de 2,2 milhões de hectares, 56%, e passou a ser superior em relação à área com queima de 1,8 milhões de hectares, representando 44% do total colhido. Em 2011, sobre a área total colhida de 4,8 milhões de hectares, 65% foi de cana-de-açúcar crua e 35% queimada. Esse é um resultado positivo para o cumprimento do Protocolo Agroambiental que pretende cessar gradualmente a prática da queima da palha, até 2014, em áreas mecanizáveis.

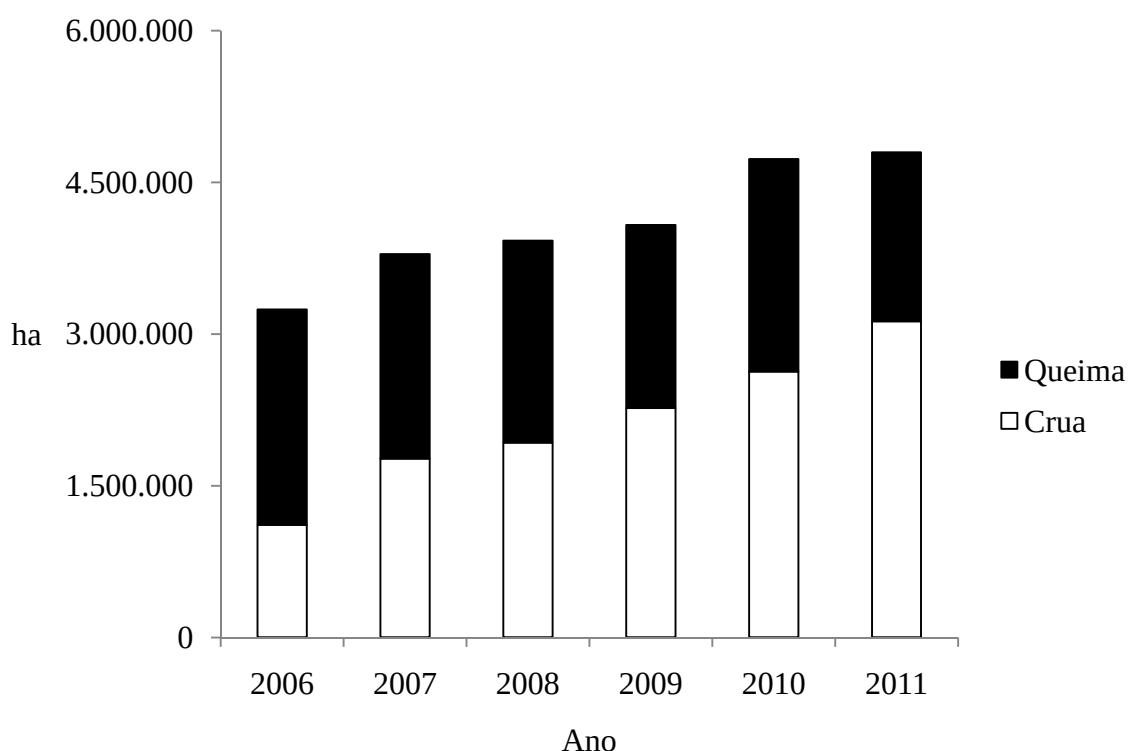


Figura 2. Área colhida de cana crua e queimada no Estado de São Paulo 2006-2011.

Fonte: Adaptado de Aguiar et al. (2011).

A diminuição das queimadas da cana-de-açúcar também se deve pelo impacto negativo que proporcionam na saúde pública. Uriarte et al. (2009) realizaram

um estudo em municípios do Estado de São Paulo sobre os efeitos dos incêndios nos canaviais associados com a saúde respiratória dos cidadãos. O estudo constatou que as práticas de queima da palha da cana contribuem para o aumento de casos de doenças respiratórias na população. Dessa maneira, os efeitos nocivos das queimadas dos canaviais não são apenas um problema para o sistema de saúde pública, mas também para as economias domésticas. Os autores concluíram que esses fatores devem ser considerados nas discussões sobre a sustentabilidade dos biocombustíveis.

Pode-se notar a tendência de intensificação do uso da mecanização na colheita da cana-de-açúcar nos próximos anos pelo aumento de práticas de colheita de cana crua. Assim, o uso da mecanização através de tecnologias menos agressivas ao meio ambiente e planejadas para melhorar a produtividade do solo e a rentabilidade do negócio estão sendo cada vez mais apreciadas pelos produtores. Dessa maneira, a adoção de práticas de agricultura de precisão nos processos agrícolas da cultura da cana-de-açúcar está sendo utilizada em larga escala no estado de São Paulo.

A agricultura de precisão é um termo abrangente dado a um conjunto de tecnologias que promovem a melhoria da gestão da produção agrícola por meio do reconhecimento de que o potencial de produtividade de terras agrícolas podem variar consideravelmente, mesmo em distâncias muito curtas. As principais tecnologias envolvidas são monitores de produtividade, com a utilização de sistemas de posicionamento global GPS (*Global Positioning System*), e sistemas de informação geográfica, que podem ser utilizados em processos de preparo do solo, plantio, tratamentos culturais e colheita. Essas práticas são apropriadas para a produção de cana-de-açúcar, em que se utiliza uma grande quantidade de maquinaria em seus processos agrícolas (BRAMLEY; QUABBA, 2001).

Para Molin et al. (2006), as técnicas de agricultura de precisão diferenciam-se dos conceitos tradicionais de agricultura pelo seu nível de gerenciamento, e o monitor de produtividade é um dentre os muitos recursos que adota essas técnicas. Dessa maneira, os conhecimentos adquiridos com as informações fornecidas pela agricultura de precisão proporcionam um melhor suporte na tomada de decisões dos produtores. Isso resulta em potenciais benefícios ambientais e economia de insumos.

Conforme pesquisas de Silva, Moraes e Molin (2011), sobre a adoção de práticas de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar em 87 empresas do setor no Estado de São Paulo, as quais representavam 57% da produção regional em

2008, constatou-se que 56% das empresas adotavam práticas de agricultura de precisão contra 44% que não adotavam. Contudo, as empresas que adotavam tecnologias de agricultura de precisão obtiveram resultados positivos, tais como melhorias no rendimento da produção, menores custos, minimização dos impactos ambientais e a melhoria da qualidade da cana-de-açúcar.

Esses mesmos autores apontaram que 10% das empresas analisadas utilizavam práticas de agricultura de precisão no mapeamento e monitoramento da colheita nas operações de corte, carregamento e transporte e também para controle de tráfego. Por fim, concluíram que o monitoramento do sensoriamento remoto da colheita de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo é fundamental para avaliar a eficácia do Protocolo Agroambiental, em termos de suas metas, para reduzir gradualmente a queima antes do corte.

Para Roque et al. (2010), a adoção do controle de tráfego permite melhorias na estrutura física do solo, porque uma maior área de solo não é compactada. Os cuidados com o controle de tráfego dentro dos talhões resultaram na adoção da tecnologia conhecida por “canteirização” ou “envazamento”, que é a adequação das bitolas de tratores e transbordos para evitar o pisoteio das soqueiras. Isso resulta em um espaço maior do solo, ao lado das soqueiras, sem compactação, o que propicia um melhor desenvolvimento do canavial e maior longevidade.

Severiano et al. (2010) sugerem a adoção de medidas preventivas, conforme a indicação de pesquisadores da área de mecanização agrícola, para evitar a compactação do solo no manejo da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, como controle do nível de pressão por eixo das máquinas, o controle do tráfego sobre resíduos culturais, o uso de plantas descompactadoras na renovação do canavial ou, ainda, a definição do nível de compactação prejudicial ao desenvolvimento da cultura.

4.6 Desempenho operacional do corte e carregamento mecanizado

Do ponto de vista das usinas e, também, de fornecedores independentes de cana-de-açúcar, o desempenho operacional ganha importância no gerenciamento, à medida que o número, o tamanho e a complexidade das máquinas aumentam. Assim, melhorias no desempenho operacional são fundamentais para a redução de custos.

Para Ripoli (1996), os ciclos operacionais das máquinas colhedoras e carregadoras estabelecem pontos importantes para a caracterização das variáveis operacionais, bem como para a determinação do estudo de tempos e movimentos. Assim, o ciclo operacional de colhedoras pode ser caracterizado por três tipos de eventos. O primeiro é o deslocamento sobre a fileira de cana em ação de colheita, o segundo são interrupções para manutenção e outros fins e, por último, as manobras de cabeceira.

O autor não só descreve que as máquinas carregadoras também possuem ciclos operacionais, mas também que devem ser observados os percursos das carregadoras em cada ciclo operacional, assim, os ciclos operacionais podem apresentar tempos diferenciados uma vez que existem diversos fatores que influenciam, tais como: o do tipo de carregadora, relevo do terreno, habilidade do operador, produtividade do canavial e posicionamento relativo da unidade de transporte em relação à carregadora.

O desempenho operacional de colhedoras de cana-de-açúcar é entendido por diversos autores como o conjunto de atributos que caracterizam o grau de habilitação da máquina para executar a operação de corte, sob determinadas condições operacionais (ASAE, 1983; FURLANI NETO; FERNANDES; MIALHE, 1977; MIALHE, 1974; MIALHE; RIPOLI, 1976; WITNEY, 1988).

Mialhe e Carraro Neto (1993) descreveram que os graus de habilitação são determinados sobre a capacidade de colheita, qualidade do processamento do produto, funcionalidade mecânica, ergonomia e segurança.

A capacidade de colheita é entendida como a quantidade de trabalho que um conjunto de máquinas ou uma colhedora isoladamente é capaz de executar na unidade de tempo. A capacidade de colheita é caracterizada, de acordo com Ripoli e Ripoli (2009), através dos seguintes parâmetros: capacidade teórica, capacidade efetiva e capacidade operacional.

A capacidade teórica revela a capacidade máxima que uma colhedora ou carregadora é capaz de desenvolver na unidade de tempo tendo como base informações dos fabricantes sobre o projeto da máquina, que relaciona a potência do motor com as dimensões físicas e limite máximo de velocidade operacional.

A capacidade efetiva pode ser obtida entre uma área ou produção em função do tempo decorrido. No entanto, não leva em conta o tempo consumido em manobras e interrupções diversas. Assim, revela a máxima quantidade de trabalho que uma

máquina é capaz de desenvolver sob uma dada condição da cultura, num certo intervalo de tempo.

A capacidade operacional é a razão entre a quantidade de matéria-prima colhida e o tempo disponível de operação da máquina no campo. Também considera a somatória do tempo efetivo com a somatória de todos os tempos de interrupção que ocorreram durante a operação numa dada jornada de trabalho ou área trabalhada. Assim, a capacidade operacional revela a quantidade de trabalho que uma máquina realiza funcionando de acordo com as condições de manejo do campo, num intervalo de tempo denominado tempo-máquina.

A eficiência ou rendimento de campo é a relação entre a capacidade operacional e a capacidade efetiva. Assim, a eficiência de campo é a razão entre o tempo efetivamente utilizado e o tempo total disponível para operação (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

Para Carvalho Filho (2000), a velocidade de operação é uma importante variável de desempenho operacional na colheita mecanizada. O autor realizou um estudo com uma colhedora com motor de 213 kW de potência, a variedade colhida foi a RB 83-5089, a qual apresentou uma produtividade média de 176,26 t ha⁻¹, em espaçamento de 1,4m, terceiro corte de cana-de-açúcar crua. O autor destacou que tanto as velocidades de operação mais baixas, de 1,5 e 3 km h⁻¹, como as velocidades mais altas, entre 5 e 7 km h⁻¹ apresentaram diferenças estatísticas relevantes quanto à capacidade de campo efetiva, assim, concluiu que as baixas velocidades e eficiências de campo elevam o custo por tonelada de cana-de-açúcar colhida.

Romero et al. (1993), em um estudo realizado em Tucumán, Argentina, com duas colhedoras de cana Class, modelos Gladiator e 2000, apontaram que a máquina Gladiator operando em velocidades de 4,9; 3,6; 5,6 e 5,7 km h⁻¹, a capacidade efetiva foi de 40, 40, 51 e 56 t h⁻¹, respectivamente. Já com a máquina 2000, em velocidades de 3,5 e 5,8 km h⁻¹, a capacidade efetiva foi de 31 e 58 t h⁻¹, respectivamente.

Rozeff (1989), em ensaio com uma colhedora de cana Class 1400 no Estado do Texas, com queima prévia da variedade CP 70-321, em diferentes velocidades de operação 1,4; 2,5; 4,2 e 5,6 km h⁻¹, destacou que a capacidade campo efetiva foi de 17,4; 28,5; 54,2; e 91,6 t h⁻¹ respectivamente.

Ripoli et al. (2001) realizaram um ensaio com uma colhedora de cana crua e apontaram que a velocidade de 5,39 km h⁻¹ apresentou o melhor desempenho

econômico, com valores de 0,66 a 3,82 US\$ t⁻¹ de cana colhida. Os mesmos autores também constataram que o processo de colheita teve o melhor desempenho econômico com uma eficiência de campo de 60%.

4.7 Custos do corte e carregamento mecanizado

O crescimento das cadeias produtivas do agronegócio como um todo veio acompanhado da complexidade das operações agrícolas mecanizadas e da necessidade de rápidas atitudes, frente à competitividade do mercado. As exigências legais para a proteção ambiental e a necessidade de controlar custos e melhorar a qualidade do produto ou dos serviços prestados são um dos principais desafios do setor sucroalcooleiro.

Segundo Ripoli e Ripoli (2009), a mecanização das operações de campo está aumentando. Dessa forma, o custo da mecanização na produção agrícola também é crescente. Portanto, maximizar a eficiência do uso da maquinaria agrícola é de grande importância para a minimização dos custos de produção. Para isso, é necessário conhecer os equipamentos e suas regulagens básicas para reduzir os custos e causar menos danos ao meio ambiente.

Nos últimos anos, vem ocorrendo uma série de mudanças na gestão de operações mecanizadas, principalmente na coleta e análise de dados na tentativa de otimizar e racionalizar as tomadas de decisão. Assim, o grande desafio da mecanização na cultura da cana-de-açúcar é o aumento da produção com qualidade e redução de custos.

As máquinas agrícolas, conforme os posicionamentos de diversos autores, representam a viabilização de sistemas de produção e uma parcela significativa na composição dos custos da atividade agrícola (MIALHE, 1974; MILAN, 2004; MOLINA JÚNIOR, 2000).

Para Balastreire (1987), o gerenciamento de sistemas mecanizados tem a finalidade de gerar lucros para a empresa. O lucro é a diferença entre a receita total e os custos totais, assim, pode-se concluir que os custos influenciam diretamente nos lucros. Por isso, é fundamental conhecer a maneira de se projetar os sistemas, controlar e calcular os custos do uso das máquinas.

O autor também aponta que os custos das operações mecanizadas são divididos em custos fixos e variáveis. Os custos fixos são aqueles que devem ser debitados independentes da máquina ser utilizada ou não, e incluem depreciação, juros e

seguro. Já os custos variáveis são caracterizados como gastos com lubrificantes, combustíveis, reparos, manutenção e mão-de-obra necessária para a operação. A partir dos custos fixos e variáveis, são estabelecidos os custos operacionais.

Segundo estudos feitos por Silva (2009), o levantamento do custo operacional constitui-se na etapa mais importante, quando através do custo horário de máquinas e da capacidade operacional das mesmas, determina-se os gastos com mecanização para cada operação agrícola, e isso possibilita a análise econômica da atividade. O autor verificou que gastos com manutenção, depreciação e combustível, são os componentes que apresentam maior influência no custo horário final do corte e carregamento em sistema mecanizado de cana-de-açúcar crua.

Esperancini et al. (2011) apontaram que os custos da colheita mecanizada da cana-de-açúcar são inversamente relacionados ao rendimento operacional das colhedoras; dessa maneira, o aumento do rendimento possibilita a diminuição do custo de colheita. Os autores também descreveram que muitos fatores podem afetar o rendimento operacional da colheita mecanizada, tais como a produtividade do canavial, declividade do terreno, condições climáticas, tombamento das plantas, entre outros, e, concluíram que os custos de colheita podem responder por até 60% do custo final de produção da cana-de-açúcar.

O setor agrícola tem se deparado com aumento nos custos dos insumos o que ocasiona a redução na lucratividade do negócio. Uma análise crítica dos custos envolvidos e a definição das prioridades para minimizá-los, sem que isso afete a produtividade das culturas, é uma forma de se evitar a perda da lucratividade.

4.8 Problemas de programação linear

Segundo Puccini (1978), a programação linear refere-se a uma técnica de otimização largamente utilizada na resolução de problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares. A sua grande difusão deve-se a linearidade do modelo, tornando-a de fácil aplicação em uma considerável quantidade de problemas, sem perdas significativas na solução.

Para Caixeta Filho (2004), a programação linear é vista como o aprimoramento de uma técnica de resolução de sistemas de equações lineares via inversão sucessiva de matrizes, com a vantagem de incorporar uma equação linear adicional

representativa de um dado comportamento que deve ser otimizado. A resolução de um modelo de programação consiste em determinar o vetor (x) que satisfaça as restrições impostas e otimize a função objetivo e esta será chamada solução ótima do problema.

Na modelagem de um problema de programação linear, devem estar bem definidos: o conjunto de variáveis manipuláveis, ou seja, as variáveis de decisão; o objetivo a ser alcançado, o qual é representado pela função objetivo, uma função linear das variáveis de decisão que deve ser maximizada ou minimizada e, por fim, as restrições do problema representadas por equações lineares através das variáveis de decisão.

As técnicas utilizadas para determinar numericamente a solução ótima de um problema de programação linear são baseadas em dois métodos: o método Simplex e o método de pontos interiores.

O método Simplex foi apresentado por Dantzig (1949) como uma forma sistemática de resolução da programação linear. Hoje existem várias modificações e adaptações desse método, a grande vantagem desse algoritmo é a facilidade de implementação e a existência de vários softwares comerciais que contêm ferramentas para resolução desse método.

O método de pontos interiores foi proposto por Karmarkar (1984) e é baseado em transformações projetivas e a grande vantagem é a sua natureza polinomial.

O algoritmo Simplex constituiu um grande avanço científico tecnológico e deu grande impulso ao campo da pesquisa operacional que nesta época estava dando os primeiros passos. O método Simplex 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 uma base e, portanto, uma solução básica ótima (FLORENTINO, 2005).

Segundo Florentino (2005), para qualquer problema de decisão, com um objetivo a ser minimizado ou maximizado, no qual as variáveis de decisão devem assumir valores discretos, é classificado como problema de programação linear inteira (PLI). Esses problemas podem ser restritos ou irrestritos. As equações que representam o objetivo e as restrições devem ser lineares ou não lineares, e as características destas equações e restrições são muito importantes para a seleção ou desenvolvimento de métodos de resolução dos problemas de PLI.

Para Lachtermacher (2004), na programação linear inteira (PLI) são tratados problemas de programação matemática em que uma ou mais variáveis de decisão são apresentadas por valores inteiros. Esses problemas podem apresentar dois tipos básicos. O primeiro é a programação inteira pura, em que todas as variáveis de decisão são do tipo inteiro. O segundo tipo é a programação inteira mista, na qual apenas uma parte das variáveis de decisão são do tipo inteiro, enquanto outras são do tipo real.

A programação linear inteira pode ser entendida como uma linha específica da programação linear. O valor da solução ótima encontrada em um problema relaxado, ou seja, em um problema de programação linear será maior que o valor ótimo encontrado no problema de programação linear inteira. Isto acontece devido aos valores dos coeficientes das variáveis de decisão serem inteiros, ou seja, a fração, que é encontrada no problema de programação linear, contribui para o aumento do valor da função objetivo (LACHTERMACHER, 2004).

Para Caixeta Filho (2004), a programação inteira pura, ou simplesmente programação inteira, é uma variação da programação linear, que também é utilizada para solução de problemas que envolvam a programação mista, estrutura linear com características inteiras e não inteiras, e particularmente para problemas que envolvam escolhas que possam ser representadas por variáveis binárias do tipo zero ou um. De maneira geral, o problema passível de solução por programação linear inteira deve ter as seguintes características: função objetivo linear; restrições lineares; variáveis positivas e algumas ou todas as variáveis inteiras.

Florentino (2005) aponta que existem vários métodos para a resolução de problemas de programação linear inteira: Algoritmo de Gomory, Algoritmo Branch-and-Bound, Geração de Colunas e Métodos de Pontos Interiores. Em geral, estes métodos estão dentro de uma das três classificações: Métodos de Planos de Corte, Métodos Enumerativos ou Algoritmos 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 algumas 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, e a Relaxação Lagrangiana.

Sherali e Driscoll (2000) apresentaram uma excelente revisão bibliográfica da programação inteira, mostrando a evolução de todos os métodos desta área até o ano 2000. Os métodos de programação linear inteira apresentam maiores dificuldades computacionais do que os métodos de programação para problemas lineares puros, mas existem muitos softwares comerciais e livres que resolvem tais problemas.

Foram desenvolvidos vários trabalhos sobre modelagem matemática com o objetivo de auxiliar o setor sucroalcooleiro. Nesses estudos buscou-se estimar a produtividade da cana-de-açúcar, aumentar os rendimentos agrícolas, baixar os custos e racionalizar as relações entre os diferentes fatores de produção na busca do máximo desempenho.

Barata (1992) utilizou programação linear para desenvolver um modelo de avaliação técnica e econômica, aplicado as questões relacionadas ao corte e à reforma de canaviais. Higgins et al. (1998) desenvolveram um modelo matemático para a determinação da programação da colheita de cana-de-açúcar ao longo de uma safra. Cock, Luna e Palma (2000) demonstraram uma metodologia sobre a utilização de modelos de otimização para escolha de variedades de cana-de-açúcar por meio da análise do custo total de processamento das variedades. Salassi, Breaux e Naquin (2002) apresentaram uma proposta que auxilia na escolha do sistema de colheita de cana-de-açúcar, por meio da aplicação de um modelo de programação inteira mista. Higgins e Davies (2005) aplicaram simulação computacional para planejar a capacidade do sistema de transporte de cana-de-açúcar.

Outros estudos apresentam modelos e métodos de otimização matemática aplicados à programação e integração do corte de cana-de-açúcar com o transporte, bem como o aproveitamento da energia desta matéria-prima (FLORENTINO, 2005; LIMA, 2006; LIMA, 2009).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Fonte de dados

Este trabalho foi realizado em uma usina sucroenergética situada na região do governo de Botucatu, interior do Estado de São Paulo. A Usina produz cana-de-açúcar, açúcar, álcool e levedura seca. Na safra 2011, realizou a colheita de cana-de-açúcar em uma área total de 39.047,85 ha, sendo que desse total 10.189,04 ha foram de área própria, 16.694,13 ha arrendados, e 12.164,68 ha de fornecedores.

Devido às exigências dos gestores da usina em estudo que não autorizaram a divulgação da marca comercial, razão social, e imagens da empresa, essas informações foram omitidas. Contudo, foi autorizada a coleta de dados para a execução deste trabalho. Assim, foram conduzidas pesquisas documentais sobre os apontamentos de campo da área estudada, os quais estavam dispostos nos bancos de dados de sistemas integrados de gestão da empresa.

Foram obtidas informações sobre os processos de corte e carregamento em uma propriedade da Usina localizada em Latitude 22° 32' 40.67" Sul e Longitude 48° 34' 11.79" Oeste. O clima da região é do tipo Cfa (Método de Köppen), clima temperado quente, mesotérmico, úmido, e com temperatura média anual de 21°C (CUNHA; MARTINS, 2009).

Na safra 2011, a propriedade apresentava uma área plantada de 671,95 ha, entretanto, a área colhida foi de 400,17 ha e o restante encontrava-se em reforma. Neste local realizou-se tanto o corte como o carregamento de cana crua de 8

variedades de cana-de-açúcar dispostas em 12 lotes, através do sistema mecanizado no período de 19 de Julho a 9 de Agosto de 2011.

Para a estimativa de custos, foram coletadas as informações quanto ao valor inicial das máquinas e implementos, ou seja, valores referentes ao maquinário novo, à vida útil dos bens, além do valor final que se refere ao valor de revenda no término da vida útil dos ativos. A Usina em análise considera como valor de revenda de 20% do valor inicial dos bens. Também foram obtidas informações sobre o salário dos operadores de máquinas, além do preço do combustível e horas acumuladas de uso da maquinaria por meio de consultas nos banco de dados da empresa.

5.2 Método

Este trabalho foi dividido em duas etapas distintas. Na primeira etapa foi criado um cenário inicial (A) por meio de metodologias descritas por pesquisadores da área de mecanização agrícola, onde foi proposta uma forma de estimar indicadores de desempenho operacional e econômico. A análise desta proposta metodológica foi realizada por meio de um estudo de caso, com a obtenção das informações sobre a área colhida, na safra 2011, quantidade de cana-de-açúcar colhida, produtividade do canavial, variedade plantada, estágio de corte, além dos percentuais de fibra e POL da cana-de-açúcar colhida.

As análises de fibra e POL da cana foram feitas pelo laboratório da própria Usina, assim, foram obtidas informações que estavam disponíveis no banco de dados cedido pela empresa. Também foram coletados dados sobre os apontamentos de campo para a determinação dos indicadores de desempenho operacional, bem como informações sobre a maquinaria utilizada pela empresa para a estimativa dos indicadores econômicos.

Na segunda etapa, foi criado um cenário otimizado (B), para este foi proposto um modelo matemático de otimização para a maximização da produção da cana-de-açúcar. Este modelo foi elaborado com o objetivo de selecionar as variedades de cana-de-açúcar que maximizem a produção de cana-de-açúcar e que atendam aos padrões de qualidade exigidos pela indústria quanto aos teores de açúcar e fibra da matéria-prima.

Para a análise do modelo matemático proposto foram utilizadas as informações sobre a produtividade ($t\ ha^{-1}$), fibra (%) e POL (%), dos primeiros quatro anos

de corte, no período de 2008 a 2012, de 25 variedades de cana-de-açúcar, dispostas em áreas próprias e arrendadas da usina, disponíveis para a Usina, as quais foram colhidas por meio de processos mecanizados. De acordo com Sartori (2001), nos quatro primeiros anos de corte há variação significativa da produtividade e da qualidade tecnológica de variedades de cana-de-açúcar e que ambas sofrem influência direta do sistema de colheita utilizado. Os dados foram submetidos a cálculos estatísticos realizados no *software* R, versão 3.0.1, de livre acesso, o qual permite a manipulação, avaliação e interpretação de procedimentos estatísticos (LABORATÓRIO DE EPIDEMIOLOGIA E BIOESTATÍSTICA, 2013).

Na implementação computacional, utilizou-se a média do primeiro ao quarto corte, dos indicadores de produtividade ($t\ ha^{-1}$), fibra (%) e POL (%) das vinte e cinco variedades para a resolução do modelo proposto, o qual foi programado na plataforma GUSEK (GLPK *Under Scite Extended Kit*), versão 4.51, software livre (GUSEK, 2008). De acordo com Magatão et al. (2011), este software é uma interface de desenvolvimento para modelos de programação linear e programação linear inteira mista.

Este aplicativo consiste em uma versão customizada do editor SciTE (*SCIntilla based Text Editor*) integrada a uma versão pré-compilada do *solver* livre GLPK (GNU *Linear Programming Kit*), para a plataforma Win32 (MAKHORIN, 2011).

Diante do cenário otimizado (B), foram estimados os indicadores de desempenho operacional e econômico com o intuito de validar o modelo matemático proposto.

5.2.1 Indicadores de desempenho operacional e econômico - Cenário Inicial (A)

A colheita é realizada por meio de uma colhedora automotriz, máquina que executa o corte, realiza o fracionamento, a limpeza e o carregamento da matéria-prima no transbordo. O transbordo é constituído por um conjunto de trator e carroceria que realiza o transporte interno, retirando a matéria-prima colhida do lote e depositando-a no veículo encarregado de transportar a matéria-prima para a Usina. O transporte da matéria-prima da propriedade para a Usina não foi considerado neste estudo.

Para atender o objetivo de avaliar, de forma sistêmica, o desempenho operacional e os custos do corte e carregamento mecanizado de cana-de-açúcar, foi desenvolvido um método adaptado das propostas de vários autores (ASABE,

2011; MIALHE, 1974; RIPOLI; RIPOLI, 2009; SANTOS, 2011). Essas propostas foram utilizadas para definir o número de equipamentos (colhedoras, tratores e carrocerias) necessários para atender a uma dada demanda no processo de colheita de cana-de-açúcar, além de apresentarem uma metodologia de custos de máquinas agrícolas.

Foram coletadas informações sobre a área de colheita, número de dias de safra, número de dias impróprios devido a condições climáticas desfavoráveis e a jornada de trabalho da Usina. Também foram obtidos os dados da safra 2011 sobre as horas de produção operacional e efetiva das colhedoras da Usina em estudo, horas despendidas com manobras de cabeceira e deslocamento das máquinas, além das horas de manutenção, abastecimento e horas administrativas não aproveitadas devido à troca de turnos e demais interrupções.

A Usina em estudo utiliza colhedoras John Deere 3520 de esteira, com potência nominal de 337 HP e efetiva de 251 kW. Estas colhem uma linha de cana por vez em sua operação. As informações quanto à velocidade média de operação da máquina foram obtidas no controle de bordo da mesma que armazena esses dados. Para a operação de transbordo, utilizou-se tratores Valtra/BH com potência nominal de 180 HP e efetiva de 132 kW, já as carrocerias são da marca Antoniosi (2 eixos).

(a) Custo de produção operacional das colhedoras

O custo de produção operacional de colhedoras, segundo Santos (2011), é determinado por meio da razão entre o custo horário das colhedoras e a capacidade de produção operacional das colhedoras. Assim, para o cálculo do custo de produção operacional das colhedoras em função do número de máquinas dimensionadas foi utilizada Equação 1.

$$CP_{co} = \frac{CH_{co}}{C_{pc} \cdot N_{co}} \quad (1)$$

Em que:

CP_{co} = custo de produção operacional das colhedoras (R\$ t⁻¹)

CH_{co} = custo horário das colhedoras (R\$ h⁻¹)

$$\begin{aligned}
C_{pc} &= \text{capacidade de produção operacional das colhedoras} \quad (\text{t h}^{-1}) \\
N_{co} &= \text{número de colhedoras} \quad (\text{unidades})
\end{aligned}$$

Observa-se que o modelo matemático que maximiza a produtividade por meio da escolha de variedades mais produtivas pode proporcionar um aumento na capacidade de produção operacional da colhedora e, conseqüentemente, em uma redução nos custos operacionais de produção por tonelada de cana-de-açúcar colhida. O custo de produção operacional da colhedora, em sua formulação expressa na Equação 1, é dependente de outras formulações descritas a seguir.

(b) Custo horário de máquinas colhedoras

O custo horário em relação ao número de colhedoras dimensionadas foi obtido através da Equação 2.

$$CH_{co} = (CF_{co} + CV_{co}) \cdot N_{co} \quad (2)$$

Em que:

$$\begin{aligned}
CH_{co} &= \text{custo horário de máquinas colhedoras} \quad (\text{R\$ h}^{-1}) \\
CF_{co} &= \text{custo fixo da colhedora} \quad (\text{R\$ h}^{-1}) \\
CV_{co} &= \text{custo variável da colhedora} \quad (\text{R\$ h}^{-1}) \\
N_{co} &= \text{número de colhedoras} \quad (\text{unidades})
\end{aligned}$$

(c) Capacidade de produção operacional da colhedora

Com base na capacidade de campo efetiva da colhedora e na produtividade média da cultura, foi estimada a capacidade de produção operacional da colhedora, através da Equação 3.

$$C_{pc} = P_{rc} \cdot C_{co} \quad (3)$$

Em que:

- C_{pc} = capacidade de produção operacional colhedora ($t h^{-1}$)
 P_{rc} = produtividade média do canavial ($t ha^{-1}$)
 C_{co} = capacidade de campo efetiva da colhedora ($ha h^{-1}$)

(d) Capacidade de campo efetiva da colhedora

A capacidade de campo efetiva da colhedora foi determinada, conforme ASABE (2011), que considera o espaçamento de cultivo, velocidade de operação e a eficiência de campo, Equação 4.

$$C_{co} = \left(\frac{N_l \cdot E_{ct} \cdot V_{co}}{10} \right) \cdot E_{fc} \quad (4)$$

Em que:

- C_{co} = capacidade de campo efetiva da colhedora ($ha h^{-1}$)
 N_l = número de linhas da colhedora (unidades)
 E_{ct} = espaçamento entre fileiras da cultura (m)
 V_{co} = velocidade média de operação da colhedora ($Km h^{-1}$)
 E_{fc} = eficiência de campo (%)

(e) Custo operacional das colhedoras

O custo operacional de colhedoras, definido por Santos (2011), é obtido pela razão entre o custo horário das colhedoras e a capacidade de campo das colhedoras. Dessa maneira, para o cálculo do custo operacional das colhedoras dimensionadas foi utilizada a Equação 5.

$$CO_{co} = \frac{CH_{co}}{C_{co} \cdot N_{co}} \quad (5)$$

Em que:

- CO_{co} = custo operacional das colhedoras ($R\$ ha^{-1}$)

CH_{co}	= custo horário das colhedoras	(R\$ h ⁻¹)
C_{co}	= capacidade de campo efetiva da colhedora	(ha h ⁻¹)
N_{co}	= número de colhedoras	(unidades)

(f) Eficiência de campo

Ripoli e Ripoli (2009) apontam que a eficiência de campo é obtida através da razão entre a capacidade de campo operacional e a capacidade de campo efetiva, a qual foi estimada conforme a Equação 6.

$$E_{fc} = \frac{C_{cop}}{C_{cef}} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que:

E_{fc}	= eficiência de campo	(%)
C_{cop}	= capacidade de campo operacional	(ha h ⁻¹)
C_{cef}	= capacidade de campo efetiva	(ha h ⁻¹)

(g) Capacidade de campo operacional

A capacidade de campo operacional foi calculada, conforme Mialhe (1974), através da Equação 7.

$$C_{cop} = \frac{A_{colh}}{T_d} \quad (7)$$

Em que:

C_{cop}	= capacidade de campo operacional	(ha h ⁻¹)
A_{colh}	= área de colheita	(ha ano ⁻¹)
T_d	= tempo disponível	(h ano ⁻¹)

(h) Tempo disponível

O tempo disponível refere-se ao número de horas disponíveis para realizar a colheita no período estipulado para a safra. O número de dias impróprios refere-se aos dias em que a operação de colheita não pode ser realizada devido a fatores relacionados ao clima. A jornada de trabalho representa o número de horas de trabalho por dia. O cálculo do tempo disponível foi obtido conforme a Equação (8).

$$T_d = (N_{td} - N_{di}) \cdot J_t \quad (8)$$

Em que:

T_d	= tempo disponível	(h ano ⁻¹)
N_{td}	= número total de dias considerados como o período de safra	(dias ano ⁻¹)
N_{di}	= número de dias impróprios no período de safra	(dias ano ⁻¹)
J_t	= jornada de trabalho	(h dia ⁻¹)

O tempo disponível ou aproveitável para a operação de corte e carregamento é composto pelo tempo de produção efetiva, o qual se refere as horas em que a colhedora encontrava-se em plena operação de corte, o tempo de manobras e deslocamento das máquinas, o tempo com manutenção das máquinas e o tempo desperdiçado com horas administrativas relativas a interrupções para trocas de turnos de trabalho, abastecimento, regulagem, desobstrução de máquinas, descanso do operador, entre outros.

(i) Capacidade de campo efetiva

De acordo com Mialhe (1974), a capacidade de campo efetiva foi obtida através da Equação 9.

$$C_{cef} = \frac{A_{colh}}{T_{pro}} \quad (9)$$

Em que:

$$\begin{aligned}
C_{cef} &= \text{capacidade de campo efetiva} \quad (\text{ha h}^{-1}) \\
A_{colh} &= \text{área de colheita} \quad (\text{ha ano}^{-1}) \\
T_{pro} &= \text{tempo de produção efetiva} \quad (\text{h ano}^{-1})
\end{aligned}$$

(j) Número de colhedoras

O número de colhedoras foi estimado por meio da Equação 10.

$$N_{co} = \frac{C_{cef}}{C_{co}} \quad (10)$$

Em que:

$$\begin{aligned}
N_{co} &= \text{número de colhedoras} \quad (\text{unidades}) \\
C_{cef} &= \text{capacidade de campo efetiva} \quad (\text{ha h}^{-1}) \\
C_{co} &= \text{capacidade de campo efetiva da colhedora} \quad (\text{ha h}^{-1})
\end{aligned}$$

(k) Quantidade de cana-de-açúcar colhida

A área colhida refere-se à área que a Usina colheu ao longo da safra agrícola. A quantidade de cana-de-açúcar colhida foi obtida por meio da Equação 11.

$$Q_{colh} = A_{colh} \cdot P_{rc} \quad (11)$$

Em que:

$$\begin{aligned}
Q_{colh} &= \text{quantidade de cana-de-açúcar colhida} \quad (\text{t ano}^{-1}) \\
A_{colh} &= \text{área de colheita} \quad (\text{ha ano}^{-1}) \\
P_{rc} &= \text{produtividade média do canavial} \quad (\text{t ha}^{-1})
\end{aligned}$$

O transbordo realiza o transporte interno, recolhendo a cana colhida pela colhedora depositando-a no veículo de transporte. É importante salientar que na Usina analisada cada transbordo é composto por um trator e duas carrocerias.

(l) Tempo total do ciclo de transbordo

O tempo total do ciclo de transbordo, conforme Santos (2011), foi obtido com a Equação (12).

$$T_{\text{tran}} = T_{\text{car}} + T_{\text{desc}} + T_{\text{desl}(\text{total})} \quad (12)$$

Em que:

T_{tran} = tempo total do ciclo de transbordo (h)

T_{car} = tempo de carregamento do transbordo (h)

T_{desc} = tempo de descarregamento do transbordo (h)

$T_{\text{desl}(\text{total})}$ = tempo total de deslocamento do transbordo (h)

(m) Tempo de carregamento do transbordo

O tempo de carregamento do transbordo foi obtido, segundo Santos (2011), pela Equação (13).

$$T_{\text{car}} = \frac{C_{\text{carg}} \cdot N_{\text{carr}}}{C_{\text{pc}}} \quad (13)$$

Em que:

T_{car} = tempo de carregamento do transbordo (h)

C_{carg} = capacidade de carga de uma carroceria (t)

N_{carr} = número de carrocerias que compõe o transbordo (unidades)

C_{pc} = capacidade de produção operacional da colhedora (t h^{-1})

O tempo de descarregamento foi fornecido pela Usina em estudo, de acordo com as informações do fabricante conforme as características do implemento agrícola.

(n) Tempo de deslocamento do transbordo

O tempo de deslocamento corresponde ao tempo de percurso realizado pelo transbordo refere-se ao deslocamento de ida carregado, colhedora até o caminhão, e o retorno vazio, do caminhão até a colhedora. O tempo de deslocamento, conforme Santos (2011), é obtido pela razão entre a distância média da colhedora ao veículo de transporte e a velocidade de deslocamento do transbordo nesse percurso, o qual foi obtido pelas Equações 14, 15 e 16.

$$T_{\text{desl(ida)}} = \left(\frac{D_{\text{mct}}}{1000 \cdot V_{\text{dt(ida)}}} \right) \quad (14)$$

Em que:

$$T_{\text{desl(ida)}} = \text{tempo de deslocamento do transbordo na ida} \quad (\text{h})$$

$$D_{\text{mct}} = \text{distância média entre a colhedora e o veículo de transporte} \quad (\text{m})$$

$$V_{\text{dt(ida)}} = \text{velocidade média de deslocamento do transbordo na ida} \quad (\text{km h}^{-1})$$

Na volta, como o transbordo retorna sem carga a velocidade média de deslocamento é diferente da ida, Equação 15.

$$T_{\text{desl(volta)}} = \left(\frac{D_{\text{mct}}}{1000 \cdot V_{\text{dt(volta)}}} \right) \quad (15)$$

Em que:

$$T_{\text{desl(volta)}} = \text{tempo de deslocamento do transbordo na volta} \quad (\text{h})$$

$$D_{\text{mct}} = \text{distância média entre a colhedora e o veículo de transporte} \quad (\text{m})$$

$$V_{\text{dt(volta)}} = \text{velocidade média de deslocamento do transbordo na volta} \quad (\text{km h}^{-1})$$

O tempo de deslocamento total foi obtido através da Equação 16.

$$T_{\text{desl(total)}} = T_{\text{desl(ida)}} + T_{\text{desl(volta)}} \quad (16)$$

$T_{\text{desl}(\text{total})}$ = tempo total de deslocamento do transbordo (h)

$T_{\text{desl}(\text{ida})}$ = tempo de deslocamento do transbordo na ida (h)

$T_{\text{desl}(\text{volta})}$ = tempo de deslocamento do transbordo na volta (h)

(o) Capacidade de produção operacional do transbordo

A eficiência de campo é considerada no cálculo da capacidade de produção operacional do transbordo porque se refere aos tempos perdidos durante o ciclo total de carregamento, descarregamento e deslocamento das máquinas e implementos. Dessa maneira, a capacidade de produção operacional do transbordo foi determinada, conforme uma adaptação de Santos (2011), através da Equação (17).

$$C_{\text{ptr}} = \left(\frac{C_{\text{carg}} \cdot N_{\text{carr}}}{T_{\text{tran}}} \right) \cdot E_{\text{fc}} \quad (17)$$

Em que:

C_{ptr} = capacidade de produção operacional do transbordo (t h^{-1})

C_{carg} = capacidade de carga de uma carroceria (t)

N_{carr} = número de carrocerias que compõe o transbordo (unidades)

T_{tran} = tempo total do ciclo de transbordo (h)

E_{fc} = eficiência de campo (%)

(p) Número de transbordos para atender uma colhedora

O número de transbordos necessários para atender a uma colhedora foi obtido, conforme Santos (2011), por meio da razão entre a capacidade de produção operacional da colhedora e a capacidade de produção operacional do transbordo, Equação 18.

$$N_{\text{tran}} = \frac{C_{\text{pc}}}{C_{\text{ptr}}} \quad (18)$$

Em que:

N_{tran} = número de transbordos para atender uma colhedora (unidades)

C_{pc} = capacidade de produção operacional da colhedora (t h^{-1})

C_{ptr} = capacidade de produção operacional do transbordo (t h^{-1})

(q) Custo horário dos transbordos

O custo horário dos transbordos foi definido conforme a Equação 19.

$$CH_{\text{tran}} = \{ [CH_{\text{trat}} + (CH_{\text{carr}} \cdot N_{\text{carr}})] \cdot N_{\text{tran}} \} \cdot N_{\text{co}} \quad (19)$$

Em que:

CH_{tran} = custo horário dos transbordos ($\text{R\$ h}^{-1}$)

CH_{trat} = custo horário do trator ($\text{R\$ h}^{-1}$)

CH_{carr} = custo horário da carroceria ($\text{R\$ h}^{-1}$)

N_{carr} = número de carrocerias que compõe o transbordo (unidades)

N_{tran} = número de transbordos para atender uma colhedora (unidades)

N_{co} = número de colhedoras (unidades)

(r) Custo operacional dos transbordos

O custo operacional dos transbordos, conforme Santos (2011), é determinado por meio da razão entre o custo horário do transbordo e a capacidade de campo da colhedora. Contudo, para a determinação do custo operacional dos transbordos em função do número de colhedoras atendidas pelos mesmos foi utilizada a Equação 20.

$$CO_{\text{tran}} = \frac{CH_{\text{tran}}}{C_{\text{co}} \cdot N_{\text{co}}} \quad (20)$$

Em que:

CO_{tran} = custo operacional dos transbordos ($\text{R\$ ha}^{-1}$)

CH_{tran} = custo horário dos transbordos ($\text{R\$ h}^{-1}$)

$$C_{co} = \text{capacidade de campo da colhedora} \quad (\text{ha h}^{-1})$$

$$N_{co} = \text{número de colhedoras} \quad (\text{unidades})$$

(s) Custo de produção operacional dos transbordos

O custo de produção operacional dos transbordos, foi obtido pela razão do custo horário do transbordo e a capacidade de produção operacional do transbordo, Equação 21.

$$CP_{tran} = \frac{CH_{tran}}{(C_{ptr} \cdot N_{tran}) \cdot N_{co}} \quad (21)$$

Em que:

$$CP_{tran} = \text{custo de produção operacional dos transbordos} \quad (\text{R\$ t}^{-1})$$

$$CH_{tran} = \text{custo horário dos transbordos} \quad (\text{R\$ h}^{-1})$$

$$C_{ptr} = \text{capacidade de produção operacional do transbordo} \quad (\text{t h}^{-1})$$

$$N_{tran} = \text{número de transbordos para atender uma colhedora} \quad (\text{unidades})$$

$$N_{co} = \text{número de colhedoras} \quad (\text{unidades})$$

5.2.1.1 Custo horário de máquinas e implementos

Foi adotada a metodologia proposta pela *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASABE, 2011), para o cálculo do custo horário da colhedora, trator e carroceria. O custo horário das máquinas e implementos foi estimado de acordo com a Equação 22.

$$CH = CF + CV \quad (22)$$

Em que:

$$CH = \text{custo horário da máquina ou implemento} \quad (\text{R\$ h}^{-1})$$

$$CF = \text{custo fixo da máquina ou implemento} \quad (\text{R\$ h}^{-1})$$

CV = custo variável da máquina ou implemento ($\text{R\$ h}^{-1}$)

(a) Custos fixos

Os custos fixos são aqueles que independem da produção das máquinas. São tratados também como custos de propriedade, sendo compostos por juros, depreciação, abrigo, seguros e demais taxas administrativas, os quais foram obtidos de acordo com a Equação 23.

$$CF = C_{\text{jur}} + C_{\text{dep}} + C_{\text{ast}} \quad (23)$$

Em que:

CF = custo fixo total ($\text{R\$ h}^{-1}$)

C_{jur} = custos com juros ($\text{R\$ h}^{-1}$)

C_{dep} = custos com depreciação ($\text{R\$ h}^{-1}$)

C_{ast} = custos com abrigo, seguros e taxas administrativas ($\text{R\$ h}^{-1}$)

Para a estimativa dos custos com juros, foi adotada uma taxa de 6% ao ano, considerada uma remuneração próxima ao rendimento anual da caderneta de poupança¹ que representa o custo de oportunidade de capital da empresa, conforme a Equação 24.

$$C_{\text{jur}} = \left[\frac{\left(\frac{V_i + V_f}{2} \right) \cdot r}{T_{\text{ut}}} \right] \quad (24)$$

Em que:

C_{jur} = custos com juros ($\text{R\$ h}^{-1}$)

¹ A remuneração da poupança é composta pela remuneração básica, dada pela Taxa Referencial - TR, e a remuneração adicional, correspondente a 0,5% ao mês, enquanto a meta da taxa Selic (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) ao ano for superior a 8,5% ou 70% da meta da taxa Selic ao ano, mensalizada, vigente na data de início do período de rendimento, enquanto a meta da taxa Selic ao ano for igual ou inferior a 8,5% (BRASIL, 2013).

V_i	=	valor inicial do ativo	(R\$)
V_f	=	valor final do ativo	(R\$)
r	=	taxa de juros	(% ano ⁻¹)
T_{ut}	=	tempo de utilização das máquinas e implementos	(h ano ⁻¹)

O tempo de utilização das máquinas é composto pelo tempo efetivo de produção e pelo tempo de manobras e deslocamento onde se considera apenas o tempo que as máquinas estão em pleno funcionamento. Assim, o tempo de utilização dos equipamentos foi obtido através da Equação 25.

$$T_{ut} = T_{pro} + T_{man} \quad (25)$$

Em que:

T_{ut}	=	tempo de utilização das máquinas e implementos	(h ano ⁻¹)
T_{pro}	=	tempo produtivo	(h ano ⁻¹)
T_{man}	=	tempo de manobra e deslocamento	(h ano ⁻¹)

O custo de depreciação estima a perda de valor no decorrer da vida útil da máquina agrícola. A estimativa do custo de depreciação é um procedimento utilizado para recuperar o investimento inicial da máquina, à medida que ela se torna obsoleta. Foi utilizado o método da depreciação linear, através da Equação 26.

$$C_{dep} = \left[\frac{\left(\frac{V_i - V_f}{V_u} \right)}{T_{ut}} \right] \quad (26)$$

Em que:

C_{dep}	=	custos com depreciação	(R\$ h ⁻¹)
V_i	=	valor inicial do ativo	(R\$)
V_f	=	valor final do ativo	(R\$)
V_u	=	vida útil do ativo	(anos)

T_{ut} = tempo de utilização das máquinas e implementos ($h \text{ ano}^{-1}$)

De acordo com ASABE (2011), para o custo de propriedade com abrigo considera-se o gasto com o local de armazenamento requerido pela máquina que representa 0,75% do valor inicial da máquina. Já para o custo com seguro é considerado o prêmio de seguro pago para a proteção contra os riscos associados a roubos, incêndios entre outros, que implicam em 0,25% do valor inicial da máquina. Para demais gastos com taxas administrativas, considera-se um valor de 1% do valor inicial da máquina. Dessa maneira, pode-se estimar um percentual total de 2% do valor inicial da máquina. Com isso, os custos com abrigo, seguros e taxas administrativas foram obtidos por meio da Equação 27.

$$C_{ast} = \left(\frac{V_i \cdot P_{ast}}{T_{ut}} \right) \quad (27)$$

C_{ast} = custos com abrigo, seguros e taxas da máquina ($R\$ h^{-1}$)
 V_i = valor inicial do ativo ($R\$$)
 P_{ast} = percentual de abrigo, seguro e taxas sobre o valor inicial do ativo ($\% \text{ ano}^{-1}$)
 T_{ut} = tempo de utilização das máquinas e implementos ($h \text{ ano}^{-1}$)

(b) Custos variáveis

Os custos variáveis se modificaram proporcionalmente em relação ao nível das operações e do tempo despendido para a realização, ou seja, o custo operacional altera-se de acordo com o desenvolvimento da operação. Para a composição dos custos variáveis totais foram considerados, conforme a ASABE (2011), os custos com: mão-de-obra, combustível, lubrificação, e reparos e manutenção, Equação 28.

$$CV = C_{mo} + C_{comb} + C_{lub} + C_{rm} \quad (28)$$

Em que:

CV = custo variável total ($R\$ h^{-1}$)

C_{mo}	= custos com a mão-de-obra	(R\$ h ⁻¹)
C_{comb}	= custos com combustível	(R\$ h ⁻¹)
C_{lub}	= custos com lubrificantes	(R\$ h ⁻¹)
C_{rm}	= custos com reparo e manutenção	(R\$ h ⁻¹)

No custo horário com a mão-de-obra dos operadores de colhedoras e tratoristas estão inclusos o salário, os benefícios que os operadores recebem e os encargos trabalhistas pagos pela empresa em análise. Foi adotado um fator de ajuste da mão-de-obra de 25% do proposto pela ASABE (2011), devido aos tempos despendidos para abastecimento, lubrificação e ajustes, conforme a Equação 29.

$$C_{mo} = S_{med} + (S_{med} \cdot FA_{mo}) \quad (29)$$

Em que:

C_{mo}	= custos com a mão-de-obra	(R\$ h ⁻¹)
S_{med}	= salário médio do operador	(R\$ h ⁻¹)
FA_{mo}	= fator de ajuste da mão-de-obra	(%)

O custo de consumo de combustível foi estimado com base na quantidade de combustível consumido, em média, pelas máquinas agrícolas e multiplicado pelo preço do óleo diesel. Banchi, Lopes e Zago (2008), apresentaram três situações de consumo: mínimo 35,19 L h⁻¹, médio 39,12 L h⁻¹ e máximo 43,06 L h⁻¹, os quais correspondem aos modelos de colhedoras de cana-de-açúcar fabricadas no País no período de 1997 a 2007.

Para o custo com consumo de combustível dos tratores que fazem parte do conjunto de transbordo foram considerados, de acordo com as informações obtidas na empresa analisada, o valor mínimo de consumo de 5,6 L h⁻¹, médio de 8,5 L h⁻¹ e máximo de 10,6 L h⁻¹.

O custo com combustível foi obtido conforme a Equação 30.

$$C_{\text{comb}} = C_{\text{med}} \cdot P_{\text{comb}} \quad (30)$$

Em que:

$$C_{\text{comb}} = \text{custos com combustível} \quad (\text{R\$ h}^{-1})$$

$$C_{\text{med}} = \text{consumo médio de combustível} \quad (\text{L h}^{-1})$$

$$P_{\text{comb}} = \text{preço do combustível} \quad (\text{R\$ L}^{-1})$$

Os custos com lubrificantes foram estimados com fator de ajuste de 15% dos custos com o combustível consumido, conforme a metodologia proposta pela ASABE (2011). Nos custos com lubrificação, estão inclusos os dispêndios com óleo de motor, óleo de transmissão e graxa, estimados para a colhedora e conjunto de transbordo, os quais foram obtidos através da Equação 31.

$$C_{\text{lub}} = C_{\text{comb}} \cdot FA_{\text{lub}} \quad (31)$$

Em que:

$$C_{\text{lub}} = \text{custos com lubrificantes} \quad (\text{R\$ h}^{-1})$$

$$C_{\text{comb}} = \text{custos com combustível} \quad (\text{R\$ h}^{-1})$$

$$FA_{\text{lub}} = \text{fator de ajuste da lubrificação} \quad (\%)$$

Os custos com reparos e manutenção incidem devido ao uso das máquinas e implementos em condições normais de uso que causam desgastes dos componentes, estes custos foram estimados conforme metodologia proposta pela ASABE (2011), através da Equação 32.

$$C_{\text{rm}} = \frac{\left[(V_i \cdot FR_1) \cdot \left(\frac{T_{\text{acum}} + T_{\text{ut}}}{1000} \right)^{FR_2} \right] - \left[(V_i \cdot FR_1) \cdot \left(\frac{T_{\text{acum}}}{1000} \right)^{FR_2} \right]}{T_{\text{ut}}} \quad (32)$$

Em que:

C_{rm}	= custos com reparo e manutenção	(R\$ h ⁻¹)
T_{acum}	= tempo de uso acumulado da máquina	(h)
T_{ut}	= tempo de utilização das máquinas e implementos	(h ano ⁻¹)
V_i	= valor inicial do ativo	(R\$)
FR_1	= fator de reparo 1 (ASABE)	(índice)
FR_2	= fator de reparo 2 (ASABE)	(índice)

De acordo com os índices também determinados pela ASABE (2011), foram adotados os fatores de reparo de máquinas automotrizes FR_1 de 0,03 e FR_2 de 2,00 para as colhedoras. Para os tratores foram considerados FR_1 de 0,003 e FR_2 de 2,00 que correspondem ao modelo utilizado pela Usina, e, por fim, os fatores de reparo das carrocerias foram de FR_1 0,19 e FR_2 1,30.

5.2.1.2 Custos totais do corte e carregamento

Para a determinação dos custos totais foram consideradas as perdas do processo de colheita da cana-de-açúcar como custos. O custo operacional total do corte e carregamento foi obtido conforme a Equação 33.

$$COT = [(CO_{co} + CO_{tran}) \cdot (1 + PT_c)] \quad (33)$$

Em que:

COT	= custo operacional total do corte e carregamento	(R\$ ha ⁻¹)
CO_{co}	= custo operacional das colhedoras	(R\$ ha ⁻¹)
CO_{tran}	= custo operacional dos transbordos	(R\$ ha ⁻¹)
PT_c	= perda total de cana-de-açúcar	(%)

O custo de produção operacional total do corte e carregamento foi obtido com a Equação 34.

$$CPOT = [(CP_{co} + CP_{tran}) \cdot (1 + PT_c)] \quad (34)$$

Em que:

CPOT	=	custo de produção operacional total do corte e carregamento	(R\$ t ⁻¹)
CP _{co}	=	custo de produção operacional das colhedoras	(R\$ t ⁻¹)
CP _{tran}	=	custo de produção operacional dos transbordos	(R\$ t ⁻¹)
PT _c	=	perda total de cana-de-açúcar	(%)

As perdas de cana-de-açúcar foram estimadas de acordo com a proposta de Furlani Neto, Fernandes e Mialhe (1977), por meio da Equação (35).

$$PT_c = (-0,03228 + 3,03606) \cdot \left(\frac{V_{co}}{3,6} \right) \quad (35)$$

Em que:

PT _c	=	perda total de cana-de-açúcar	(%)
V _{co}	=	velocidade média de operação da colhedora	(Km h ⁻¹)

Os indicadores de desempenho operacional e econômico também foram estimados diante da resposta do modelo matemático apresentado a seguir. Com isso, foram comparadas as informações obtidas com o intuito de verificar os efeitos do aumento da produção nos custos das operações mecanizadas de corte e carregamento da cana-de-açúcar.

5.2.2 Modelo matemático - Cenário Otimizado (B)

Neste tópico, foi formulado o modelo matemático para maximização da produção da cana-de-açúcar, a seguir há uma descrição do problema de programação linear inteira proposto.

Deseja-se determinar qual a variedade i , dentre as n variedades de cana-de-açúcar adaptáveis ao solo local, deve ser plantada em cada lote j , $j=1, \dots, k$, de forma a obter a máxima produção de cana-de-açúcar, atendendo a demanda de açúcar da usina e respeitando os limitantes de fibra estabelecidos pela usina.

Para formulação do modelo, considere X_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$ e $j = 1, 2, \dots, k$, a variável de decisão em que $X_{ij}=1$ se a variedade i deve ser plantada no lote j e $X_{ij} = 0$ em caso contrário.

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k S_i L_j X_{ij} \quad (36)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i X_{ij} \geq \bar{A} \quad (37)$$

$$\sum_{j=1}^k \bar{F}_i X_{ij} \leq \sum_{j=1}^k F_i X_{ij} \leq \sum_{j=1}^k \bar{F}_s X_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (38)$$

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

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (40)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, k \quad (41)$$

Em que $i = 1, 2, \dots, n$, são índices associados às variedades; $j = 1, 2, \dots, k$, são índices associados aos lotes; S_i é a produtividade de cana-de-açúcar da variedade i em $t \text{ ha}^{-1}$; L_j é a área do lote j em ha ; A é o POL percentual da variedade i ; $\bar{A}$ é o limitante de açúcar exigido, o qual deve ser igual ou superior a 12,5%; F_i é o percentual de fibra da variedade i ; e, por fim $\bar{F}_i$ e $\bar{F}_s$ são os limitantes inferior e superior estabelecidos para a fibra da cana-de-açúcar, os quais foram definidos como $\bar{F}_i = 8\%$ e $\bar{F}_s = 14\%$; $\bar{L}$ é o limitante superior de área, o qual determina que cada variedade deve ser plantada em uma área de até 15% da área total.

A função objetivo (36) visa à maximização da produtividade de cana-de-açúcar nos lotes pré-estabelecidos. A restrição (37) garante que a demanda de açúcar da usina seja atendida, conforme Lavanholi (2008), isso ocorre quando o POL da cana-de-açúcar for acima de 12,5%. A restrição (38) define que as variedades de cana-de-açúcar tenham teores de fibra de 8 a 14%, segundo Lavanholi (2008), nesse intervalo, a cana-de-açúcar é considerada madura de acordo com sua composição química. A restrição

(39) define que cada variedade deve ser plantada em uma área de no máximo 15% da área total dos lotes, conforme Brasil (2008), para minimizar os riscos de infestações de doenças na cultura da cana-de-açúcar. A restrição (40) garante a plantação de uma única variedade por lote. A restrição (41) restringe a variável de decisão em 0 ou 1, se plantar a variedade i no lote j , $X_{ij}=1$ ou $X_{ij}=0$ se não plantar.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do cenário inicial (A) foram estruturados para a demonstração dos cálculos referentes ao dimensionamento técnico do número de máquinas e implementos, bem como os respectivos indicadores de desempenho operacional e econômico das operações mecanizadas de acordo com a metodologia proposta. Posteriormente, buscou-se apresentar os resultados do cenário otimizado (B), diante da resposta do modelo matemático proposto, bem como os indicadores de desempenho operacional e econômico diante do novo cenário para a validação do modelo de otimização.

6.1 Indicadores de desempenho operacional - Cenário inicial (A)

Na propriedade analisada foram colhidas 38.737,08 toneladas de cana-de-açúcar em uma área de 400,17 ha, na safra 2011. Assim, a produtividade média da cultura foi de 96,8 t ha⁻¹, conforme os dados da Tabela 4. Neste local, encontravam-se plantadas oito variedades de cana-de-açúcar distribuídas em doze lotes. Nos lotes 11 e 12, estavam plantadas diversas variedades de cana-de-açúcar em proporções não especificadas. Destaca-se que o estágio de corte influencia na produtividade da cultura, uma vez que os primeiros cortes apresentam uma maior produtividade em relação aos demais estágios.

Tabela 4. Informações tecnológicas sobre as variedades analisadas na safra 2011.

Lote	Variedade	Estágio de corte	Quantidade colhida (t)	Área colhida (ha)	Produtividade (t ha ⁻¹)	Fibra (%)	POL da Cana (%)
1	SP 813250	1º corte	8.560,57	53,18	160,97	11,75	13,75
2	SP 813250	2º corte	5.501,37	49,64	110,83	11,75	14,01
3	SP 813250	2º corte	4.844,20	41,06	117,98	11,67	14,55
4	SP 803280	7º corte	3.967,22	50,36	78,78	12,54	15,75
5	PO 8862	4º corte	1.394,06	17,76	78,49	11,77	14,53
6	PO 8862	4º corte	2.354,28	31,65	74,38	12,16	14,69
7	SP 891115	6º corte	2.065,07	25,55	80,82	11,65	14,03
8	RB 855453	6º corte	1.890,82	26,36	71,73	11,56	13,97
9	RB 835486	7º corte	133,00	1,69	78,70	11,38	13,96
10	RB 855536	4º corte	2.157,82	28,32	76,19	12,16	14,98
11	Várias	3º corte	4.071,78	51,93	78,41	11,87	14,46
12	Várias	3º corte	1.796,89	22,67	79,26	11,42	14,29
Total			38.737,08	400,17			

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Na Tabela 5, estão descritos os apontamentos das máquinas utilizadas no processo de colheita quanto às horas que as máquinas estavam em funcionamento e horas que se encontravam paradas.

Tabela 5. Aproveitamento do tempo disponível pelas máquinas - Cenário inicial (A).

Descrição da operação	Situação	Horas
Corte de cana crua	Funcionamento	301,96
Deslocamento com máquina		9,34
Abastecimento e lubrificação	Manutenção	9,11
Limpeza de máquina		2,46
Manutenção		26,89
Troca de facas		3,18
Verificação das máquinas	Administrativas	1,40
Chuva/Solo molhado		42,15
Falta de caminhão		23,42
Falta de trator		18,58
Troca de turno		3,66
Usina parada		7,88
Aguardando operação		0,55
Aguardando comboio		0,93
Aguardando caminhão prancha		1,65
Deslocamento com caminhão prancha		2,84
Total		456,00

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

A colheita foi realizada no período de 19 de Julho a 9 de Agosto de 2011, o que resultou em 22 dias de safra, no entanto, tiveram 3 dias impróprios para a operação de colheita devido a chuvas. A jornada de trabalho da Usina é dividida em três turnos de oito horas, totalizando vinte e quatro horas de trabalho diário. Assim, o tempo disponível foi de 456 horas.

Verifica-se, na Tabela 6, que foram 301,96 horas de produção efetiva das máquinas e 9,34 horas despendidas com manobras de cabeceira e deslocamento das máquinas, isso representou um total de 311,30 horas de funcionamento das máquinas. Também é possível verificar que as máquinas ficaram 41,64 horas em manutenção e 103,06 horas administrativas não aproveitadas devido à troca de turnos e demais interrupções, que resultou em 144,70 horas com as máquinas paradas.

Tabela 6. Dados para estimativa dos indicadores de desempenho operacional - Cenário inicial (A).

Descrição	Valores	Unidades
Área de colheita	400,17	(ha ano ⁻¹)
Número total de dias considerados como o período de safra	22,00	(dias ano ⁻¹)
Número de dias impróprios no período de safra	3,00	(dias ano ⁻¹)
Jornada de trabalho	24,00	(h dia ⁻¹)
Horas inaproveitadas - Industrial/Climática	72,00	(h ano ⁻¹)
Horas produtivas - Produção	301,96	(h ano ⁻¹)
Horas de manobra - Manobra e Deslocamento	9,34	(h ano ⁻¹)
Horas indisponíveis - Manutenção preventiva e corretiva	41,64	(h ano ⁻¹)
Horas não produzidas - Administrativa	103,06	(h ano ⁻¹)
Número de linhas da colhedora	1,00	(unidades)
Espaçamento entre fileiras da cultura	1,50	(m)
Velocidade média de operação da colhedora	3,80	(Km h ⁻¹)
Produtividade média do canavial	96,8	(t ha ⁻¹)
Capacidade de carga de uma carroceria	12,00	(t)
Número de carrocerias que compõe o transbordo	2,00	(unidades)
Distância média entre a colhedora e o veículo de transporte	400,00	(m)
Velocidade média de deslocamento do transbordo na ida	7,00	(km h ⁻¹)
Velocidade média de deslocamento do transbordo na volta	10,00	(km h ⁻¹)

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

A capacidade de campo operacional foi de 0,88 ha h⁻¹ (Tabela 7) a qual representa a capacidade das máquinas e implementos e que inclui os efeitos de fatores de ordem operacional. Esses efeitos são representados por tempos consumidos no preparo das máquinas e em interrupções, além do tempo requerido pelo próprio trabalho da máquina quando em operação no campo.

Tabela 7. Indicadores de desempenho operacional - Cenário inicial (A).

Descrição	Valores	Unidades
Capacidade de campo operacional	0,88	(ha h ⁻¹)
Capacidade de campo efetiva	1,33	(ha h ⁻¹)
Eficiência de campo	66,22	(%)
Capacidade de campo efetiva da colhedora	0,38	(ha h ⁻¹)
Capacidade de produção operacional da colhedora	36,54	(t h ⁻¹)
Número de colhedoras	3,51	(unidades)
Tempo total do ciclo de transbordo	0,83	(h)
Tempo de carregamento do transbordo	0,66	(h)
Tempo de descarregamento do transbordo	0,08	(h)
Tempo de deslocamento do transbordo na ida	0,06	(h)
Tempo de deslocamento do transbordo na volta	0,04	(h)
Tempo total de deslocamento do transbordo	0,10	(h)
Capacidade de produção operacional do transbordo	19,06	(t h ⁻¹)
Número de transbordos para atender uma colhedora	1,92	(unidades)

Fonte: O próprio autor, 2013.

A capacidade de campo efetiva foi estimada em 1,33 ha h⁻¹ (Tabela 7) e representa a capacidade básica das máquinas, isto é, a capacidade das máquinas realizarem a operação durante certo intervalo de tempo de produção efetiva. Por meio da razão entre a capacidade de campo operacional e a capacidade de campo efetiva obteve-se a eficiência de campo de 66,22 %.

A capacidade de campo efetiva das colhedoras foi de 0,38 ha h⁻¹ (Tabela 7), a qual foi calculada considerando a eficiência de campo já descrita e que a máquina colhe uma linha de cana-de-açúcar por vez em sua operação, com espaçamento entre as linhas da cultura de 1,5 metros e velocidade média de operação de 3,8 Km h⁻¹. A capacidade de produção operacional da colhedora de cana foi de 36,54 t h⁻¹, que foi obtida

multiplicando-se a produtividade média do canavial e a capacidade de campo efetiva das colhedoras.

Foi estimado um número de 3,51 colhedoras (Tabela 7), ou seja, aproximadamente 4 colhedoras como sendo o número de máquinas para realizar a operação de colheita por meio da razão entre a capacidade de campo efetiva, que representa a capacidade das máquinas realizarem a operação de colheita sobre a área determinada durante o tempo efetivo de produção, e a capacidade de campo efetiva da colhedora que considera a velocidade média de operação, a eficiência de campo, o espaçamento da cultura e o número de linhas da máquina.

O transporte interno é realizado pelo conjunto de transbordo que recolheu a cana-de-açúcar colhida pela colhedora depositando-a no veículo de transporte. Na Usina analisada, cada transbordo é composto por um trator e duas carrocerias com uma capacidade de carga de 12 toneladas por carroceria. O tempo de carregamento do conjunto de transbordo foi estimado em 0,66 horas (Tabela 7) que foi obtido pela razão entre a capacidade de carga do transbordo e a capacidade de produção operacional da colhedora.

O tempo de descarregamento foi de 0,08 horas, conforme as informações do fabricante da carroceria. O tempo total de deslocamento foi de 0,10 horas, o qual foi estimado considerando uma distância média de 400 metros da colhedora até o veículo de transporte e uma velocidade média de deslocamento na ida de aproximadamente 7 km h^{-1} , e de 10 km h^{-1} na volta. Assim, o tempo total do ciclo do conjunto de transbordo foi de 0,83 horas, conforme dados da Tabela 7.

A capacidade de produção operacional do transbordo (Tabela 7) foi de $19,06 \text{ t h}^{-1}$, a qual foi obtida em função da capacidade de carga total do transbordo, do tempo total do ciclo do transbordo e da eficiência de campo. Com isso, foi estimado um número de 1,92 transbordos, ou seja, aproximadamente dois conjuntos de transbordos para atender uma colhedora, o qual foi obtido pela razão entre a capacidade de produção operacional da colhedora e a capacidade de produção operacional do transbordo. Isso resulta num total de oito conjuntos de transbordo para a operação de colheita, uma vez que foram dimensionadas quatro colhedoras.

6.2 Indicadores econômicos - Cenário inicial (A)

Para a estimativa dos custos das operações mecanizadas de colheita, foram obtidas informações a respeito do número de horas acumuladas das colhedoras que foi de 923 horas (Tabela 8). O consumo de combustível da colhedora foi estimado em $39,12 \text{ L h}^{-1}$, conforme o consumo médio de colhedoras descrito na metodologia. O salário do operador foi de $21,81 \text{ R\$ h}^{-1}$, o qual inclui encargos trabalhistas e demais benefícios.

Tabela 8. Dados da Colhedora John Deere 3520.

Descrição	Valores	Unidades
Horas de uso acumuladas da máquina	923,00	(h)
Consumo de Diesel	39,12	(L h^{-1})
Salário do operador	21,81	($\text{R\$ h}^{-1}$)
Taxa de juros	6,00	($\% \text{ ano}^{-1}$)
Vida útil do ativo	10	(anos)
Valor inicial do ativo	850.000,00	(R\$)
Valor final do ativo (20% do valor inicial)	170.000,00	(R\$)
Preço do combustível	1,70	($\text{R\$ L}^{-1}$)
Potência nominal	337	(HP)
Potência efetiva	251	(kW)
Percentual de abrigo, seguro e taxas administrativas	2	($\% \text{ ano}^{-1}$)
Fator de ajuste da lubrificação	15	(%)
Fator de ajuste de da mão-de-obra	25	(%)
Fator de reparo 1	0,03	(índice)
Fator de reparo 2	2,00	(índice)

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

As informações descritas na Tabela 9 indicam as estimativas de custos da colhedora.

Tabela 9. Custo horário da colhedora - Cenário inicial (A).

	Itens	Unidade (R\$ h ⁻¹)
Custo fixo	Juros	98,30
	Depreciação	218,44
	Abrigo, seguros e taxas	54,61
	Subtotal	371,35
Custo variável	Mão-de-obra	27,26
	Combustível	66,50
	Lubrificantes	9,98
	Reparos e manutenção	55,01
	Subtotal	158,75
Total		530,10

Fonte: O próprio autor, 2013.

Como foram dimensionadas aproximadamente quatro colhedoras para o processo de colheita, segue na Tabela 10, os demais indicadores de custos em função do número determinado de máquinas.

Tabela 10. Indicadores econômicos de quatro colhedoras - Cenário inicial (A).

Itens	Valores	Unidades
Custo horário das colhedoras	2.120,40	(R\$ h ⁻¹)
Custo operacional das colhedoras	1.404,42	(R\$ ha ⁻¹)
Custo de produção operacional das colhedoras	14,51	(R\$ t ⁻¹)

Fonte: O próprio autor, 2013.

O conjunto de transbordo apresentou 1.028 horas acumuladas de uso, conforme os dados da Tabela 11, esses indicadores se referem aos dados obtidos no controle de bordo das máquinas. O trator tem um valor inicial de 165 mil de reais, vida útil de 10 anos e valor final de 20% do valor do ativo novo. O consumo de combustível do trator foi estimado em 8,5 L h⁻¹, conforme faixa de consumo média descrita na metodologia. O salário do operador foi de 10,66 R\$ h⁻¹, o qual inclui encargos trabalhistas e demais benefícios.

Tabela 11. Dados do Trator Valtra BH 180.

Descrição	Valores	Unidades
Horas de uso acumuladas da máquina	1.028,00	(h)
Consumo de Diesel	8,50	(L h ⁻¹)
Salário do operador	10,66	(R\$ h ⁻¹)
Taxa de juros	6,00	(% ano ⁻¹)
Vida útil do ativo	10	(anos)
Valor inicial do ativo	165.000,00	(R\$)
Valor final do ativo (20% do valor inicial)	33.000,00	(R\$)
Preço do combustível	1,70	(R\$ L ⁻¹)
Potência nominal	180	(HP)
Potência efetiva	132	(kW)
Percentual de abrigo, seguro e taxas administrativas	2	(% ano ⁻¹)
Fator de ajuste da lubrificação	15	(%)
Fator de ajuste de da mão-de-obra	25	(%)
Fator de reparo 1	0,003	(índice)
Fator de reparo 2	2,00	(índice)

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Na Tabela 12, segue o custo horário do trator.

Tabela 12. Custo horário do trator - Cenário inicial (A).

	Itens	Unidade (R\$ h ⁻¹)
Custo fixo	Juros	19,08
	Depreciação	42,40
	Abrigo, seguros e taxas	10,60
	Subtotal	72,08
Custo variável	Mão-de-obra	13,33
	Combustível	14,45
	Lubrificantes	2,17
	Reparos e manutenção	1,17
	Subtotal	31,12
Total		103,20

Fonte: O próprio autor, 2013.

A carroceria tem um valor inicial de 40 mil reais, vida útil de 10 anos e valor final de 20% do valor do ativo novo, conforme dados da Tabela 13.

Tabela 13. Dados do Transbordo de arrasto Antoniosi de 2 eixos.

Descrição	Valores	Unidades
Horas de uso acumuladas do implemento	1.028,00	(h)
Taxa de juros	6,00	(% ano ⁻¹)
Vida útil do ativo	10	(anos)
Valor inicial do ativo	40.000,00	(R\$)
Valor final do ativo (20% do valor inicial)	8.000,00	(R\$)
Preço do combustível	1,70	(R\$ L ⁻¹)
Percentual de abrigo, seguro e taxas administrativas	2	(% ano ⁻¹)
Fator de ajuste da lubrificação	15	(%)
Fator de ajuste de da mão-de-obra	25	(%)
Fator de reparo 1	0,19	(índice)
Fator de reparo 2	1,30	(índice)

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Na Tabela 14, estão descritos os custos do implemento do trator.

Tabela 14. Custo horário da carroceria - Cenário inicial (A).

	Itens	Unidade (R\$ h ⁻¹)
Custo fixo	Juros	4,63
	Depreciação	10,28
	Abrigo, seguros e taxas	2,57
	Subtotal	17,48
Custo variável	Reparos e manutenção	10,38
	Subtotal	10,38
Total		27,86

Fonte: O próprio autor, 2013.

Como foi dimensionado um número aproximado de dois transbordos para cada colhedora, na Tabela 15 apresentam-se os indicadores de custos de oito conjuntos de transbordo.

Tabela 15. Indicadores econômicos de oito conjuntos de transbordo - Cenário inicial (A).

Itens	Valores	Unidades
Custo horário dos transbordos	1.218,86	(R\$ h ⁻¹)
Custo operacional dos transbordos	807,30	(R\$ ha ⁻¹)
Custo de produção operacional dos transbordos	8,34	(R\$ t ⁻¹)

Fonte: O próprio autor, 2013.

Pode-se dizer que o custo de produção operacional das operações de corte e carregamento foi de 22,85 R\$ t⁻¹, sem considerar as perdas. No entanto, as perdas foram estimadas em 3,17% do total colhido. Contabilizando-se as perdas como custos, foram estimados o custo operacional total em 2.281,85 R\$ ha⁻¹ e o custo de produção operacional total do corte e carregamento em 23,57 R\$ t⁻¹.

6.3 Resolução do modelo matemático - Cenário otimizado (B)

Para a resolução do modelo matemático proposto, utilizou-se a média do primeiro ao quarto corte, dos indicadores de produtividade ($t\ ha^{-1}$), fibra (%) e POL (%) de vinte e cinco variedades de cana-de-açúcar que foram colhidas com processos mecanizados no período de 2008 a 2012, conforme os dados estatísticos descritos nas tabelas a seguir.

Tabela 16. Produtividade ($t\ ha^{-1}$) das variedades de cana-de-açúcar do 1° ao 4° corte.

Variedades	Média	Desvio Padrão	Q 1	Mediana	Q 3	n
CTC 15	110,12	29,48	92,28	105,86	117,97	120
CTC 16	102,87	28,55	82,30	101,08	106,63	10
CTC 2	92,39	28,45	70,86	87,32	113,15	155
CTC 5	96,37	26,15	79,96	90,54	122,05	10
CTC 6	121,64	38,30	95,69	109,86	145,83	58
CTC 9	118,20	36,01	91,49	110,20	150,37	39
IACSP93-3046	101,44	24,69	82,41	89,95	126,71	59
IACSP95-5000	110,61	23,71	92,15	108,60	124,42	38
PO 8862*	97,07	37,85	67,56	88,73	122,79	626
RB 835486*	108,71	54,81	76,86	98,00	135,54	13
RB 855156	96,70	32,85	75,06	93,37	111,87	374
RB 855453*	99,70	29,24	83,19	101,80	116,65	287
RB 855536*	91,00	30,38	69,98	85,94	102,66	241
RB 867515	92,35	30,15	71,74	89,50	109,41	5520
RB 925211	105,70	33,16	80,90	101,54	125,23	1085
RB 935744	93,81	33,63	71,16	87,35	113,44	559
RB 946903	110,21	26,89	93,88	109,10	130,04	50
RB 965902	107,31	21,44	95,80	105,29	117,50	54
RB 965917	114,65	23,17	99,28	114,86	138,79	36
SP 791011	99,34	43,48	67,63	94,67	116,87	80
SP 801816	99,68	29,47	87,34	95,53	107,17	55
SP 801842	94,45	30,32	78,38	92,16	107,28	1134
SP 803280*	89,46	37,55	67,36	84,74	112,06	160
SP 813250*	109,15	34,91	83,56	101,85	128,28	650
SP 891115*	104,39	35,39	83,77	106,12	119,94	256

* Variedades colhidas na safra 2011.

Fonte: O próprio autor, 2013.

Na Tabela 16, são apresentadas as variáveis estatísticas: média, desvio padrão, primeiro quartil (Q 1), mediana, e terceiro quartil (Q 3) calculadas no *software* R, versão 3.0.1. O número de amostras (n) corresponde aos lotes onde se

encontravam plantadas as variedades em áreas próprias e arrendadas da empresa estudada. Observa-se que os valores da mediana são próximos aos valores da média, isso indica que há simetria no conjunto de dados analisados.

Para a escolha das variedades mais produtivas, também foram incluídas as variedades colhidas na área analisada na safra 2011. No entanto, não foi considerada a opção denominada VÁRIAS, descrita no cenário inicial (A), porque, nesse caso, não há como reproduzir exatamente o mesmo plantio nas próximas plantações, uma vez que nesses lotes encontravam-se plantadas diversas variedades em proporções não especificadas.

Na Tabela 17, apresentam-se os indicadores de fibra das variedades de cana-de-açúcar.

Tabela 17. Fibra (%) das variedades de cana-de-açúcar do 1º ao 4º corte.

Variedades	Média	Desvio Padrão	Q 1	Mediana	Q 3	n
CTC 15	11,50	0,76	10,93	11,41	11,78	120
CTC 16	12,19	0,61	11,76	12,18	12,68	10
CTC 2	12,42	0,90	11,62	12,41	12,94	155
CTC 5	11,93	0,49	11,77	12,10	12,21	10
CTC 6	11,31	0,90	10,44	11,43	11,82	58
CTC 9	11,54	0,41	11,12	11,56	11,85	39
IACSP93-3046	12,03	0,63	11,45	12,05	12,73	59
IACSP95-5000	11,34	0,76	10,77	10,96	11,65	38
PO 8862*	12,48	1,34	11,58	12,17	13,01	626
RB 835486*	12,60	0,69	12,13	12,75	13,14	13
RB 855156	11,75	0,97	11,21	11,60	12,16	374
RB 855453*	12,42	1,29	11,70	12,22	12,78	287
RB 855536*	12,52	1,22	11,66	12,27	13,08	241
RB 867515	12,48	1,11	11,74	12,38	13,09	5520
RB 925211	11,94	1,26	11,10	11,70	12,52	1085
RB 935744	12,57	1,19	11,73	12,51	13,17	559
RB 946903	11,35	0,98	10,91	11,17	11,55	50
RB 965902	12,12	1,46	10,94	11,77	13,09	54
RB 965917	11,40	1,12	10,31	11,30	12,23	36
SP 791011	13,61	1,20	12,76	13,41	14,44	80
SP 801816	12,23	0,93	11,37	12,41	13,01	55
SP 801842	12,50	0,83	11,98	12,42	12,96	1134
SP 803280*	12,68	0,84	12,10	12,52	13,13	160
SP 813250*	11,70	0,80	11,24	11,61	12,01	650
SP 891115*	12,02	1,69	11,02	11,59	12,43	256

* Variedades colhidas na safra 2011.

Fonte: O próprio autor, 2013.

Na Tabela 18, são demonstrados os dados sobre o POL (%) das variedades analisadas.

Tabela 18. POL (%) das variedades de cana-de-açúcar do 1º ao 4º corte.

Variedades	Média	Desvio Padrão	Q 1	Mediana	Q 3	n
CTC 15	13,26	1,33	12,25	13,53	14,35	120
CTC 16	13,91	0,83	13,43	13,99	14,26	10
CTC 2	14,85	1,10	13,86	14,88	15,82	155
CTC 5	14,43	1,19	13,30	14,82	15,42	10
CTC 6	14,18	1,52	12,81	14,74	15,41	58
CTC 9	13,74	1,33	12,86	13,30	14,79	39
IACSP93-3046	15,50	1,08	14,92	15,12	16,30	59
IACSP95-5000	12,63	1,42	11,14	12,81	13,11	38
PO 8862*	13,73	1,60	12,67	13,63	14,89	626
RB 835486*	15,19	1,21	14,69	15,70	15,92	13
RB 855156	13,75	1,23	12,87	13,71	14,58	374
RB 855453*	14,26	1,09	13,70	14,12	15,22	287
RB 855536*	14,09	1,47	13,09	14,46	14,98	241
RB 867515	14,13	1,51	13,06	14,19	15,24	5520
RB 925211	13,05	1,61	11,86	13,05	14,12	1085
RB 935744	13,59	1,42	12,76	13,63	14,79	559
RB 946903	13,14	1,29	12,14	13,28	13,70	50
RB 965902	13,33	1,60	11,98	12,42	15,16	54
RB 965917	13,24	1,46	12,71	13,51	14,01	36
SP 791011	14,54	1,27	13,96	14,79	15,19	80
SP 801816	13,48	1,87	12,57	13,97	14,52	55
SP 801842	14,26	1,27	13,40	14,24	15,19	1134
SP 803280*	14,96	1,17	13,85	15,20	15,90	160
SP 813250*	14,07	1,34	13,18	14,00	15,03	650
SP 891115*	13,58	1,46	12,71	13,69	14,46	256

* Variedades colhidas na safra 2011.

Fonte: O próprio autor, 2013.

Diante dos dados das Tabelas 17 e 18, nota-se que a média de todas as variedades analisadas apresentaram teores de açúcar e fibra exigidos pela indústria, assim, houve apenas a seleção das variedades mais produtivas.

O resultado do modelo matemático está descrito na Tabela 19. Conforme as informações apresentadas na metodologia o modelo foi programado na plataforma GUSEK, o qual se encontra detalhado em apêndice. O modelo apresentou solução factível e sequência viável de operações, que foram obtidas em tempo computacional de 2,3 segundos (processador *Intel i5*, 8 *Gbyte* RAM, GLPK v4.51).

Também atendeu todas as restrições, indicando a viabilidade de aplicação do modelo matemático desenvolvido para o problema proposto.

Pode-se observar (Tabela 19) que para este cenário otimizado é proposta a plantação das variedades de cana-de-açúcar que se apresentaram mais produtivas, nos lotes descritos no cenário inicial (A), considerando a média do 1º ao 4º corte, no período de 2008 a 2012, as quais obtiveram a qualidade tecnológica de fibra(%) e POL(%) descritas nas restrições do modelo matemático. A produtividade média da cultura é estimada em 113,5 (t ha⁻¹), isso representa um aumento de 17,25% comparando-se com a produtividade do cenário inicial (A) de 96,8 (t ha⁻¹).

Tabela 19. Proposta de plantação de variedades - Cenário otimizado (B).

Lote	Variedades	Produtividade (t ha ⁻¹) média do 1º ao 4º corte	Área (ha)	Quantidade a ser colhida (t)	Fibra(%) média do 1º ao 4º corte	POL(%) média do 1º ao 4º corte
1	RB 965917	114,65	53,18	6.096,85	11,40	13,24
2	SP 813250*	109,15	49,64	5.418,43	11,70	14,07
3	CTC 9	118,20	41,06	4.853,09	11,54	13,74
4	CTC 15	110,12	50,36	5.545,79	11,50	13,26
5	CTC 9	118,20	17,76	2.099,15	11,54	13,74
6	CTC 6	121,64	31,65	3.849,99	11,31	14,18
7	RB 946903	110,21	25,55	2.815,85	11,35	13,14
8	RB 946903	110,21	26,36	2.905,12	11,35	13,14
9	RB 965917	114,65	1,69	193,75	11,40	13,24
10	CTC 6	121,64	28,32	3.444,92	11,31	14,18
11	IACSP95-5000	110,61	51,93	5.744,15	11,34	12,63
12	RB 835486*	108,71	22,67	2.464,42	12,60	15,19
Total			400,17	45.431,52		

* Variedades colhidas na safra 2011.

Fonte: O próprio autor, 2013.

Verifica-se, diante do cenário otimizado apresentado na (Tabela 19), que foram escolhidas as variedades SP 813250 e RB 835486, as quais já se encontravam plantadas na safra 2011, no entanto, houve a alteração da variedade RB 835486 do lote 9 para o lote 12 e manteve-se a variedade SP 813250 no lote 2. Pode-se observar que, as duas variedades mais produtivas CTC 6 e CTC 9 são sugeridas para o plantio nos lotes 6, 10, 3 e 5, respectivamente, e correspondem por 31,36% da produção total estimada.

Barbosa (2013) indica que, para a escolha das variedades a serem plantadas, deve-se considerar muitas variáveis, como a adaptabilidade à colheita mecânica, maturação, brotação da soqueira, produtividade ($t\ ha^{-1}$) e ($kg\ de\ ATR\ ha^{-1}$), características tecnológicas exigidas pela indústria como (POL, BRIX e teor de fibra), bem como sua adaptação ao ambiente de produção.

Margarido e Santos (2013) destacam que, no planejamento varietal, além da produção de colmos, deve-se considerar a maturação das variedades, a qual é influenciada pelas condições edafoclimáticas. As variedades consideradas precoces devem ser colhidas nos meses de abril a junho; variedades de ciclo médio, nos meses de julho a setembro; e as variedades tardias em outubro e novembro. As curvas de maturação das variedades consideradas precoces, médias ou tardias são muito semelhantes e que, normalmente, a maior concentração de açúcares ocorre no fim de agosto ou início de setembro, porém o que determina a precocidade da variedade é o fato da mesma ser mais rica naquele período em relação às demais variedades, ou seja, atinge a maturação antes das demais variedades.

Os autores também informam que a definição de qual variedade plantar é uma decisão técnica e administrativa. Na área técnica, determina-se qual é o ambiente de produção onde vai ser plantada a variedade, dado pelo tipo de solo e pelo clima da região. No campo administrativo, é necessário observar que a época de colheita da cana-de-açúcar é determinada pelo ciclo da variedade.

6.4 Indicadores de desempenho operacional - Cenário otimizado (B)

Para a estimativa dos indicadores de desempenho operacional foram considerados os apontamentos descritos no cenário inicial (A), Tabela 6, com alteração apenas na produtividade média da cultura, $113,5 \text{ t ha}^{-1}$, conforme a Tabela 20.

Tabela 20. Dados para estimativa dos indicadores de desempenho operacional - Cenário otimizado (B).

Descrição	Valores	Unidades
Área de colheita	400,17	(ha ano ⁻¹)
Número total de dias considerados como o período de safra	22,00	(dias ano ⁻¹)
Número de dias impróprios no período de safra	3,00	(dias ano ⁻¹)
Jornada de trabalho	24,00	(h dia ⁻¹)
Horas inaproveitadas - Industrial/Climática	72,00	(h ano ⁻¹)
Horas produtivas - Produção	301,96	(h ano ⁻¹)
Horas de manobra - Manobra e Deslocamento	9,34	(h ano ⁻¹)
Horas indisponíveis - Manutenção preventiva e corretiva	41,64	(h ano ⁻¹)
Horas não produzidas - Administrativa	103,06	(h ano ⁻¹)
Número de linhas da colhedora	1,00	(unidades)
Espaçamento entre fileiras da cultura	1,50	(m)
Velocidade média de operação da colhedora	3,80	(Km h ⁻¹)
Produtividade média do canavial	113,50	(t ha ⁻¹)
Capacidade de carga de uma carroceria	12,00	(t)
Número de carrocerias que compõe o transbordo	2,00	(unidades)
Distância média entre a colhedora e o veículo de transporte	400,00	(m)
Velocidade média de deslocamento do transbordo na ida	7,00	(km h ⁻¹)
Velocidade média de deslocamento do transbordo na volta	10,00	(km h ⁻¹)

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Observa-se, conforme as informações descritas na Tabela 21, os indicadores de desempenho operacional diante do cenário otimizado, onde se destaca a capacidade de produção operacional da colhedora de $42,85 \text{ (t h}^{-1}\text{)}$ e a capacidade de produção operacional do transbordo de $21,56 \text{ (t h}^{-1}\text{)}$, as quais foram maiores do que as estimativas apresentadas no cenário inicial (A) de $36,54 \text{ (t h}^{-1}\text{)}$ e $19,06 \text{ (t h}^{-1}\text{)}$, respectivamente (Tabela 7), devido ao aumento na produtividade da cultura. Isso

ocasionou uma redução no tempo total de ciclo do transbordo que foi de 0,74 h, comparando-se com o mesmo indicador do cenário inicial (A) de 0,83 h (Tabela 7).

Tabela 21. Indicadores de desempenho operacional - Cenário otimizado (B).

Descrição	Valores	Unidades
Capacidade de campo operacional	0,88	(ha h ⁻¹)
Capacidade de campo efetiva	1,33	(ha h ⁻¹)
Eficiência de campo	66,22	(%)
Capacidade de campo efetiva da colhedora	0,38	(ha h ⁻¹)
Capacidade de produção operacional da colhedora	42,85	(t h ⁻¹)
Número de colhedoras	3,51	(unidades)
Tempo total do ciclo de transbordo	0,74	(h)
Tempo de carregamento do transbordo	0,56	(h)
Tempo de descarregamento do transbordo	0,08	(h)
Tempo de deslocamento do transbordo na ida	0,06	(h)
Tempo de deslocamento do transbordo na volta	0,04	(h)
Tempo total de deslocamento do transbordo	0,10	(h)
Capacidade de produção operacional do transbordo	21,56	(t h ⁻¹)
Número de transbordos para atender uma colhedora	1,99	(unidades)

Fonte: O próprio autor, 2013.

Diante do cenário otimizado, foram dimensionadas 3,51 colhedoras, ou seja, aproximadamente quatro máquinas para a realização da colheita (Tabela 21). Para atender uma colhedora foram dimensionados 1,99 transbordos, ou seja, aproximadamente dois conjuntos de transbordos. Esses indicadores não tiveram mudanças significativas comparando-se com o cenário inicial (A), no qual foram estimados os mesmos números de máquinas para a realização das operações de corte e carregamento, que resultou em quatro colhedoras e oito conjuntos de transbordos.

6.5 Indicadores econômicos - Cenário otimizado (B)

Para a estimativa dos custos das operações mecanizadas de colheita, no cenário otimizado, foram considerados os dados das mesmas máquinas e implementos descritos no cenário inicial (A) nas Tabelas 8, 11 e 13. No entanto, foi estimado o consumo de combustível da colhedora de 43,06 L h⁻¹ e de 10,60 L h⁻¹ para o trator que faz parte do conjunto de transbordo, conforme o consumo de combustível

máximo de colhedoras e tratores descrito na metodologia, uma vez que há um maior consumo de combustível diante do aumento da capacidade de produção operacional da colhedora e do transbordo. Isso corrobora com estudos de Santos (2011), onde se constatou que com a maior produtividade no talhão é preciso considerar o aumento no consumo de combustível das colhedoras de cana-de-açúcar, devido a maior carga imposta ao motor.

Na Tabela 22 são destacados os custos da colhedora estimados para o cenário otimizado. Pode-se notar que o custo fixo permaneceu o mesmo comparando-se com o cenário inicial (A). Por outro lado, o custo variável foi de 166,46 R\$ h⁻¹, o qual representou um aumento de 4,63% em relação ao cenário inicial (A) que foi de 158,75 R\$ h⁻¹ (Tabela 9), uma vez que houve um maior consumo de combustível e lubrificantes.

Tabela 22. Custo horário da colhedora - Cenário otimizado (B).

	Itens	Unidade (R\$ h ⁻¹)
Custo fixo	Juros	98,30
	Depreciação	218,44
	Abrigo, seguros e taxas	54,61
	Subtotal	371,35
Custo variável	Mão-de-obra	27,26
	Combustível	73,21
	Lubrificantes	10,98
	Reparos e manutenção	55,01
	Subtotal	166,46
Total		537,81

Fonte: O próprio autor, 2013.

Foram dimensionadas aproximadamente quatro colhedoras para o processo de colheita. Na Tabela 23, segue os demais indicadores de custos em função do número determinado de máquinas.

Tabela 23. Indicadores econômicos de quatro colhedoras - Cenário otimizado (B).

Itens	Valores	Unidades
Custo horário das colhedoras	2.151,21	(R\$ h ⁻¹)
Custo operacional das colhedoras	1.424,83	(R\$ ha ⁻¹)
Custo de produção operacional das colhedoras	12,55	(R\$ t ⁻¹)

Fonte: O próprio autor, 2013.

Pode-se notar, conforme Tabela 23, que houve um aumento no custo horário das colhedoras e, conseqüentemente, no custo operacional das colhedoras por hectare, comparando-se com as informações do cenário inicial (A), Tabela 10, devido ao acréscimo nos custos variáveis. Contudo, o custo de produção operacional das colhedoras foi de 12,55 R\$ t⁻¹, isso corresponde a uma diminuição de 13,51% comparando-se com o mesmo indicador do cenário inicial (A) de 14,51 R\$ t⁻¹.

Conforme os dados da Tabela 24, verifica-se os custos do trator estimados para o cenário otimizado. Pode-se notar que o custo fixo permaneceu o mesmo comparando-se com o cenário inicial (A). Porém, o custo variável foi de 35,22 R\$ h⁻¹, o qual representou um aumento de 11,64% em relação ao cenário inicial (A) que foi de 31,12 R\$ h⁻¹, visto que foi estimado um maior consumo de combustível e lubrificantes. O custo horário da carroceria diante do cenário otimizado foi de 27,86 R\$ h⁻¹, ou seja, não houve alteração comparando-se com o mesmo indicador do cenário inicial (A).

Tabela 24. Custo horário do trator - Cenário otimizado (B).

	Itens	Unidade (R\$ h ⁻¹)
Custo fixo	Juros	19,08
	Depreciação	42,40
	Abrigo, seguros e taxas	10,60
	Subtotal	72,08
Custo variável	Mão-de-obra	13,33
	Combustível	18,02
	Lubrificantes	2,70
	Reparos e manutenção	1,17
	Subtotal	35,22
Total		107,30

Fonte: O próprio autor, 2013.

De acordo com as informações descritas na Tabela 25, percebe-se que houve um aumento no custo horário dos transbordos e, conseqüentemente, no custo operacional dos transbordos por hectare, comparando-se com as informações do cenário inicial (A) devido ao acréscimo nos custos variáveis. No entanto, o custo de produção operacional dos transbordos foi de 7,56 R\$ t⁻¹, o qual corresponde a uma redução de 9,35% comparando-se com o mesmo indicador do cenário inicial (A) de 8,34 R\$ t⁻¹.

Tabela 25. Indicadores econômicos de oito conjuntos de transbordo - Cenário otimizado (B).

Itens	Valores	Unidades
Custo horário dos transbordos	1.296,25	(R\$ h ⁻¹)
Custo operacional dos transbordos	858,55	(R\$ ha ⁻¹)
Custo de produção operacional dos transbordos	7,56	(R\$ t ⁻¹)

Fonte: O próprio autor, 2013.

O custo de produção operacional das operações de corte e carregamento, diante do cenário otimizado, sem contabilizar os custos com perdas, foi de 20,11 R\$ t⁻¹. As perdas foram estimadas em 3,17% do total colhido, mesmo percentual estimado para o cenário inicial (A), uma vez que a velocidade média da colhedora foi mantida em 3,8 km h⁻¹ para a estimativa do cenário otimizado (B). Dessa maneira, considerando-se as perdas como custos, o custo operacional total das operações de corte e carregamento foi de 2.355,78 R\$ ha⁻¹, e, consequentemente, o custo de produção operacional total do corte e carregamento, foi de 20,75 R\$ t⁻¹, o qual foi, aproximadamente, 12% menor do que o mesmo indicador do cenário inicial (A) de 23,57 R\$ t⁻¹, conforme dados da Tabela 26.

Tabela 26. Comparativo dos indicadores de custos totais dos cenários (A) e (B).

Itens	Cenário inicial (A)	Cenário otimizado (B)	Unidades
Custo operacional total do corte e carregamento	2.281,85	2.355,78	(R\$ ha ⁻¹)
Custo de produção operacional total do corte e carregamento	23,57	20,75	(R\$ t ⁻¹)

Fonte: O próprio autor, 2013.

Para Salvi et al. (2010) o gerenciamento do sistema mecanizado antes e durante a execução do projeto torna-se relevante para a redução de custos. Neste estudo, os autores constataram que um aumento em 5% na eficiência operacional, reduz o custo do corte mecanizado em 8%. Os autores também descreveram que investimentos em tecnologia agrícola visando o incremento de produtividade também se tornam atrativos em relação aos custos de colheita, pois um aumento em 10 t ha⁻¹ da produtividade, reduz os custos de colheita em 10,2%.

Oliveira e Nachiluk (2011) realizam um estudo nas regiões de Jaú, Piracicaba, Ribeirão Preto, Araçatuba, Assis e Catanduva, consideradas as mais representativas no Estado de São Paulo em relação à quantidade de cana-de-açúcar

fornecida às usinas e número de fornecedores. Os autores destacaram que, na cultura da cana-de-açúcar, a variável regional interfere na maneira de condução da cultura e na possibilidade de mecanização, principalmente nos processos de colheita. Também relataram que o custo operacional total, em relação às regiões que realizaram a colheita mecanizada pelas usinas, foi de R\$ 19,10 $\text{R\$ t}^{-1}$, 22,06 $\text{R\$ t}^{-1}$, e 23,84 $\text{R\$ t}^{-1}$ nas regiões de Piracicaba, Ribeirão Preto e Jaú, respectivamente.

7 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que a metodologia criada para estimar os indicadores de desempenho operacional e econômico auxilia no planejamento das operações de colheita tanto para o dimensionamento do número de máquinas e implementos quanto para a projeção dos custos das operações de corte e carregamento da cana-de-açúcar.

A modelagem matemática proposta, problema de programação linear inteira, se mostrou uma ferramenta eficaz para o planejamento otimizado do canavial porque contribuiu para a escolha de variedades que promovem a maximização da produção de cana-de-açúcar, as quais apresentaram os padrões de qualidade da matéria-prima exigidos pela indústria.

O modelo matemático também pode ser utilizado para a realização de novas combinações ano a ano considerando-se os dados históricos das áreas de colheita de cana-de-açúcar da empresa analisada com o intuito de selecionar as variedades adaptáveis ao solo e ambiente local e que apresentam maior produtividade com a adoção de operações mecanizadas de corte e carregamento.

Diante do cenário otimizado, houve um aumento de 17,25% da produção e, conseqüentemente, ocasionou um aumento na capacidade de produção operacional das máquinas que realizaram as operações de corte e carregamento, isso contribuiu para uma redução de 12% no custo de produção operacional total do corte e carregamento por tonelada colhida.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, D. A. et al. Remote sensing images in support of environmental protocol: monitoring the sugarcane harvest in São Paulo State, Brazil. **Remote Sensing**, São José dos Campos, v. 3, n. 12, p. 2682-2703, 2011. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/3/12/2682>>. Acesso em: 25 set. 2012.
- ALFONSI, R. R. et al. Condições climáticas para cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42-55.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. Agricultural Machinery Management Data. **ASABE D497.7: standards**. St. Joseph, 2011. 8 p.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING. **Yearbook of standards 1983-1984**. St. Joseph, 1983. 140 p.
- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 307 p.
- BANCHI, A. D.; LOPES, J. R.; ZAGO, C. A. Uso anual e consumo de combustível em frotas agrícolas. **Revista Agrimotor**, São Paulo, v. 1, n. 39, p. 8-10, 2008.
- BARATA, M. Q. F. **Otimização econômica do corte e reforma de canaviais**. 1992. 173 f. Dissertação (Mestrado em Economia Agrária)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.
- BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: Planalsucar, 1977. 122 p.
- BARBOSA, V. F. A. M. Sistemas de plantio. In: SANTOS, F.; BORÉM, A. (Ed.). **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. Viçosa: Edição dos editores, 2013. p. 27-48.

BRAMLEY, R. G. V.; QUABBA, R. P. **Opportunities for improving the management of sugarcane production through the adoption of precision agriculture: an Australian perspective**. Mildura: Southern Precision Agriculture Association, 2001. Disponível em: <http://www.cse.csiro.au/client_serv/resources/ISSCT01.pdf>. Acesso em: 25 set. 2012.

BRASIL. Banco Central do Brasil. **Remuneração dos depósitos de poupança**. Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/poupanca/poupanca.asp>>. Acesso em: 21 jan. 2013.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento**. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_12_08_11_00_54_08.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2011.

BRASIL. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Ativos da cana de açúcar**. 4. ed. Brasília: 2012a. Disponível em: <http://www.canaldoprodutor.com.br/sites/default/files/ativos_CANA_4-web.pdf>. Acesso em: 3 set. 2012.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2012: resultados preliminares**. Brasília, DF, 2012b. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 10 set. 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Ferrugem Laranja: ameaça iminente aos canaviais brasileiros**. Brasília, DF, 2008. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/images/MAPA/arquivos_portal/Cana_ferrugem_laranja.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2013.

BRIEGER, F. O. Início da safra: como determinar a maturação. **Boletim Informativo Copereste**, Ribeirão Preto, v. 4, p. 1-3, abr. 1968.

CAIXETA FILHO, J. V. **Pesquisa operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2004. 169 p.

CAMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. 242 p.

CARVALHO FILHO, S. M. **Colheita mecanizada: desempenho operacional e econômico em cana sem queima prévia**. 2000. 108 f. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

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

CLARKE, M. A.; LEGENDRE, B. R. Qualidade da cana-de-açúcar: impactos no rendimento do açúcar e fatores de qualidade. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 6, 1999.

COCK, J. H.; LUNA, C. A.; PALMA, A. The trade-off between total harvestable production and concentration of the economically useful yield component: cane tonnage and sugar content. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 67, n. 3, p. 257-262, ago. 2000.

CORRÊA, C. F. **Avaliação das perdas na colheita mecanizada de cana-de-açúcar por controle estatístico de processo**. 2006. 90 f. Monografia (Graduação em Engenharia Agrônômica)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

CORREIA, E. L. **A retomada do uso de álcool combustível no Brasil**. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada)-Faculdade de Economia e Administração, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2007.

COSTA NETO, J. D. A cana em tempo bom. **Revista CREA-PR**, Curitiba, n. 41, p. 16-19, out. 2006.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009.

DANTZIG, G. B. **Programming in a linear structure, comptroller, United States Air Force**. Washington, DC: Econometrica, 1949. 123 p.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SÓCIOECONÔMICOS. **Contrato de prestação de serviços entre CEAS urbano PE e DIEESE**. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.dieese.org.br/dieese/projetos/MTE/estudoDeCaso4.pdf>>. Acesso em 20 jul. 2013.

ESPERANCINI, M. S. T.; MIGUEL, F. B.; FURLANETO, F. P. B. Custos de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Agriworld**, Bragança Paulista, v. 2, n. 1, p. 2-7, 2011.

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

FURLANI NETO, V. L.; FERNANDES, J. E.; MIALHE, L. G. Ensaio preliminar com colhedora Massey-Fergusson 201 – cane commander. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 1, p. 11-15, 1977.

GAZON, A. L. Canavial Mecanizado. **Farm Forum**. Curitiba, v. 1, n. 26, p. 11, 2009. Disponível em: <<http://www.caseih.com/brazil/Sobre-Nos/Documents/Revista%20N%2026.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2012.

GERALDI, G. O País do etanol. **Horizonte Geográfico**, São Paulo, n. 112, 2007. Disponível em: <http://www.horizontegeografico.com.br/index.php?acao=exibirMateria&materia%5Bid_materia%5D=159>. Acesso em: 05 fev. 2011.

GONÇALVES, D. B. **Mar de cana, deserto verde? Dilemas do desenvolvimento sustentável na produção canavieira paulista**. 2005. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: <http://www.bdt.d.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado/tde_arquivos/1/TDE-47:11Z-833/Publico/TeseDBG.pdf>. Acesso em: 08 maio 2011.

GOUVÊA, J. R. F. et al. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical southern Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 5, p. 593-605, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162009000500003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 set. 2012.

GRAVOIS, K. A; MILLIGAN, S. B. Genetic relationships between fiber and sugarcane yield components. **Crop Science**, Madison, v. 32, n. 1, p. 62-67, 1992.

GUSEK. **GLPK under scite extended kit**. [S.l], 2008. Disponível em <<http://gusek.sourceforge.net/gusek.html>>. Acesso em: 12 de jul. 2013.

HIGGINS, A. J.; DAVIES, I. A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. **Computers and Electronics in Agriculture**, Philadelphia, v. 47, n. 2, p. 85-102, 2005.

HIGGINS, A. J. et al. Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 57, n. 2, p. 153-162, maio 1998.

HORII, J. A qualidade da matéria-prima, na visão agrícola. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 91-93, 2004.

KARMARKAR, N. A new polynomial time algorithm for linear programming. **Combinatorica**, Berlin, v. 4, n. 2, p. 373-395, 1984.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisão: modelagem em Excel**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

LAVANHOLI, M.G.D.P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 697-722.

LABORATÓRIO DE EPIDEMIOLOGIA E BIOESTATÍSTICA. **Programa R**. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://vps.fmvz.usp.br/CRAN/>>. Acesso em: 15 jun. 2013.

LIMA; A. D. **Modelos matemáticos aplicados a problemas na cultura da cana-de-açúcar e no aproveitamento da energia da biomassa**. 2006. 75 f. (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista , Botucatu, 2006.

LIMA, A. D. **Otimização do aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar**. 2009. 76 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

LOPES, C. H. **Glossário de termos técnicos para a indústria sucroalcooleira**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool, 1986. 32 p.

MACHADO, F. B. P. Brasil, a doce terra: história do setor. **Jornal da Cana**, Ribeirão Preto, 2003. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/Conteudo/HistoriadoSetor.asp>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

MAGALHAES, P. S. G.; BALDO, R. F. G.; CERRI, D. G. P. Sistema de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 274-282, abr./jun. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-691620080002000008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01 jun. 2012.

MAGATÃO, L. et al. Otimização do balanceamento de uma linha de montagem de cabines de caminhões por meio de programação linear inteira mista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 43., 2011, Ubatuba. **Anais...** Ubatuba: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. p. 70-81. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2011/pdf/87661.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2013.

MAKHORIN, A. **GLPK: GNU linear programming kit**. Moscow: Department for Applied Informatics; Aviation Institute, 2011. Disponível em: <<http://gnu.org/software/glpk>>. Acesso em: 15 de jul. 2013.

MARGARIDO, F. B.; SANTOS, F. Planejamento da lavoura. In: SANTOS, F.; BORÉM (Ed.). **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Edição dos editores, 2013. p. 9-25.

MARQUES, P. V. (Coord.). **Custo de produção agrícola e industrial de cana-de-açúcar e álcool no Brasil na safra 2007/2008**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2009. 194 p.

MENEGUELLO, L. A.; CASTRO, M. C. A. A. O protocolo de Kyoto e a geração de energia elétrica pela biomassa da cana-de-açúcar como mecanismo de desenvolvimento limpo. **Interações**, Campo Grande, v. 8, n. 1, p. 33-43, mar. 2007.

MIALHE, L. G.; CARRARO NETO, H. C. **Avaliação e análise do desempenho de colhedora de cana-de-açúcar**: relatório. Olímpia: Usina Cruz Alta de Olímpia, 1993. 170 p.

MIALHE, L. G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agrônômica Ceres, 1974. 301 p.

MIALHE, L. G.; RIPOLI, T. C. C. **Evaluación de cosechadoras automotrices de caña de azúcar**. Caracas: Distribuidora Venezolana de Azúcares, 1976. p. 189-204.

MILAN, M. **Gestão sistêmica e planejamento de máquinas agrícolas**. 2004. 100 f. Tese (Livre-Docência)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MOLIN, J. P. et al. Utilização de dados georreferenciados na determinação de parâmetros de desempenho em colheita mecanizada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 3, dez. 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162006000300013&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 27 set. 2012.

MOLINA JÚNIOR, W. F. **Proposta de metodologia descritiva para ensaio padronizado de colhedoras de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2000. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

NOGUEIRA, G.; ROSSINI, C. Plantio mecanizado: um caminho sem volta. **Revista Canavieiros**, Sertãozinho, v. 5, n. 53, p. 20-21, nov. 2010. Disponível em: <http://www.revistacanavieiros.com.br/canavieiro/ed53novembro10.pdf> >. Acesso em: 14 maio 2010.

NOVAES, M. R. et al. Análise espacial da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar: perspectivas futuras ao cumprimento do protocolo agroambiental. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 3, p. 572-583, maio/jun. 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162011000300017&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 10 set. 2012.

OLIVEIRA, M. D. M.; NACHILUK, K. Custo de produção de cana-de-açúcar nos diferentes sistemas de produção nas regiões do Estado de São Paulo. **Informações econômicas**, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 5-18, jan. 2011.

OLIVEIRA, M. S. **A mecanização do corte da cana-de-açúcar na Destilaria S/A à luz da teoria da tomada de decisão**. 2010. 71 f. Tese (Doutorado em Administração)-Universidade Municipal de São Caetano do Sul, São Caetano do Sul, 2010.

ORLANDO FILHO, J. O. et al. Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. **STAB: açúcar e álcool**, Piracicaba, v. 14, n. 5, p. 13-17, 1996.

PELOIA, P. R.; MILAN, M.; ROMANELLI, T. L. Capacity of the mechanical harvesting process of sugar cane billets. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 67, n. 6, p. 619-623, dez. 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162010000600001&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 13 set. 2012.

PUCCINI, A. L. **Introdução à programação linear**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978. 252 p.

REIS, G. N. **Perdas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar crua em função do desgaste das facas do corte de base**. 2009. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do Solo)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009. Disponível em:

<<http://www.fcav.unesp.br/download/pgtrabs/cs/d/2314.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2011.

RIPOLI, M. L. C.; RIPOLI, T. C. C. Evaluation of five sugar cane planters. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1110-1122, nov./dez. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n6/a12v30n6.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2012.

RIPOLI, T. C. C. Ensaio e certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar. In: MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas ensaios e certificação**. Piracicaba: FEALQ, 1996. cap. 13, p. 635-673.

RIPOLI, T. C. C.; PARANHOS, S. B. Colheita. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar, cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 517-597.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. 2. ed. Piracicaba: Edição dos Autores, 2009. 333 p.

RIPOLI, T. C. C.; MOLINA JÚNIOR, W. F.; RIPOLI, M. L. C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 677-681, out./dez. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162000000400013&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 02 out. 2012.

RIPOLI, T. C. C. et al. Desempenho econômico de colhedora em cana crua. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 12, n. 1, p. 1-5, 2001.

RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. S. **Em direção à sustentabilidade da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil**. 2006. Disponível em:

<<http://www.ecoa.org.br/arquivos/444052181.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2013.

RODRIGUES, E. B.; ABI SAAB, O. J. G. Avaliação técnico-econômica da colheita manual e mecanizada da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Bandeirantes – PR. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 4, p. 581-588, out./dez. 2007.

ROMERO, M. L. C. et al. Evaluación de nuevas cosechadoras integrales. **Avance Agroindustrial**, Tucumán, v. 13, n. 52, p. 24-28, mar. 1993.

ROQUE, A. A. O. et al. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 7, p. 744-750, jul. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v45n7/16.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2013.

ROSA, L. V.; CARVALHO, W. P. A. Perdas no corte. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v. 1, n. 98, p. 16-19, jul. 2010. Disponível em: <http://www.grupocultivar.com.br/site/revistas/maquinas/maquinas_98.pdf>. Acesso em: 17 set. 2013.

ROZEFF, N. The effects of operating velocity on productivity in green and burned sugar cane. **Sugar Cane**, Foster City, v. 1, n. 1, p. 7-19, nov. 1989.

RUDORFF, B. F. T. et al. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo state (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/2/4/1057>>. Acesso em: 25 set. 2012.

SALASSI, M. E.; BREAUX, J. B.; NAQUIN, C. J., Modeling Within-season sugarcane growth for optimal harvest system selection. **Agricultural System**, Essex, v. 73, n. 1, p. 261-278, 2002.

SALVI, J. V. et al. Análise do desempenho operacional e econômico da colheita mecanizada em um sistema de produção de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 48., 2010, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2010. p. 1-18. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/15/157.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2013.

SÃO PAULO (Estado). Companhia de Tecnologia de Saneamento. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2007**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/publicacoes.asp>>. Acesso em: 23 set. 2008.

SANTOS, N. B. **Identificação dos fatores críticos da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Máquinas Agrícolas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11148/tde-19102011-090951/pt-br.php>>. Acesso em: 13 jun. 2012.

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 Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

SEVERIANO E. C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: i - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 404-413, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n3/05.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2013.

SHERALI, H. D.; DRISCOLL, P. J. Evolution and State-of-the-art in integer programming. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, Amsterdam, v. 124, n. 12, p. 319-340, 2000. Disponível em: <<http://chentserver.uwaterloo.ca/aelkamel/che720/saad/opt-tutorials/04062001204902493.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2012.

SILVA, C. B.; MORAES, M. A. F. D.; MOLIN, J. P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. **Precision Agriculture**, New York, v. 12, n. 1, p. 67-81, 2011. Disponível em: <<http://rd.springer.com/article/10.1007%2Fs11119-009-9155-8>>. Acesso em: 19 set. 2012.

SILVA, G. F. **Análise de custos operacionais e eficiência gerencial para conjuntos trator-implemento em operações agrícolas**. 2009. 31 f. Relatório de Estágio (Engenharia Agrônômica)- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. Disponível em:

<<http://www.ler.esalq.usp.br/download/gmap/estagio/Gustavo.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2011.

STUPIELLO, J. P. A cana-de-açúcar como matéria-prima. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 761-804.

STUPIELLO, J. P. Alguns aspectos de qualidade da matéria-prima. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 7, n. 3/5, p. 52-54, 1989.

TOPPA, E. V. B. et al. Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 3, n. 3, p. 215-221, 2010. Disponível em:

<<http://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/viewFile/1065/1256>>. Acesso em: 22 jul. 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Dados e cotações**. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 12 out. 2012.

URIARTE, M. et al. Expansion of sugarcane production in São Paulo, Brazil: implications for fire occurrence and respiratory health. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 132, n. 1/2, p. 48-56, 2009. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880909000760>>. Acesso em: 25 out. 2012.

URQUIAGA, S. et al. **Importância de não queimar a palha na cultura de cana-de-açúcar**. Seropédica: EMBRAPA-CNPBS, 1991. 6 p. (Comunicado Técnico, 5). Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAB-2010/27130/1/cot005.pdf>>. Acesso em: 1 out. 2012.

USTILIN, E. J.; SEVERO, J. 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: 24 set. 2010.

VIATOR, R. P. et al. Sugarcane chopper harvester extractor fan and ground speed effects on yield and quality. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 23, n. 1, p. 31-34, jan. 2007. Disponível em: <<http://naldc.nal.usda.gov/download/19263/PDF>>. Acesso em: 20 out. 2012.

WITNEY, B. **Choosing and using farm machines**. Madison: Longman Scientific & Technical, 1988. 412 p.

APÊNDICE

Para a programação do modelo matemático foram realizados os seguintes comandos na plataforma 1, arquivo com extensão .dat

"Modelo_canamod.dat"

data;

param n:=25;

param k:=12;

param A_barra:=12.5;

param F_barra_I:=0.08;

param F_barra_S:=0.14;

#Produtividade, POL e Fibra da variedade i=1,...,25

param:

	S	A	F:=
1	110.12	.1326	.1150
2	102.87	.1391	.1219
3	92.39	.1485	.1242
4	96.37	.1443	.1193
5	121.64	.1418	.1131
6	118.20	.1374	.1154
7	101.44	.1550	.1203
8	110.61	.1263	.1134
9	97.07	.1373	.1248
10	108.71	.1519	.1260
11	96.70	.1375	.1175
12	99.70	.1426	.1242
13	91.00	.1409	.1252
14	92.35	.1413	.1248
15	105.70	.1305	.1194
16	93.81	.1359	.1257
17	110.21	.1314	.1135
18	107.31	.1333	.1212
19	114.65	.1324	.1140
20	99.34	.1454	.1361
21	99.68	.1348	.1223
22	94.45	.1426	.1250
23	89.46	.1496	.1268
24	109.15	.1407	.1170
25	104.39	.1358	.1202;

#Área do lote k

param L:=

1	53.18
2	49.64
3	41.06

4	50.36
5	17.76
6	31.65
7	25.55
8	26.36
9	1.690
10	28.32
11	51.93
12	22.67;

end;

Os comandos da plataforma 2, arquivo com extensão .mod, são descritos a seguir:

"Modelo_canamod.mod"

/* PRC - Problema de rotação de Culturas*/

param n, integer, > 0;
param k, integer, > 0;

set Cana:= 1..n;
set Lotes:= 1..k;

param S{i in Cana};
param L{j in Lotes};
param A{i in Cana};
param A_barra, > 0;
param F{i in Cana};
param F_barra_I, > 0;
param F_barra_S, > 0;

var x{i in Cana, j in Lotes}, binary;

/* Objetivo maximizar a produção */

maximize produtividade: sum{i in Cana, j in Lotes} S[i]*L[j]*x[i,j];

/* Restrição de demanda*/

subject to Demanda: sum{i in Cana, j in Lotes} A[i]*L[j]*x[i,j] >= A_barra;

#Restrições de Fibra

subject to Fibra_inferior{i in Cana}: sum{j in Lotes} F[i]*x[i,j] >= sum{j in Lotes} F_barra_I*x[i,j];

subject to Fibra_superior{i in Cana}: sum{j in Lotes} F[i]*x[i,j] <= sum{j in Lotes} F_barra_S*x[i,j];

#Restrições de Variedades

subject to Variedades{j in Lotes}: sum{i in Cana} x[i,j] = 1;

```
#Restrições de cobertura de áreas
subject to Areas{i in Cana}: sum{j in Lotes} L[j]*x[i,j] <= 0.15 *sum{j in Lotes} L[j];

solve;
display x;
```

A tela de resposta do modelo apresenta-se descrita a seguir:

```
"Modelo_canamod.mod" -d "Modelo_canamod.dat"
GLPSOL: GLPK LP/MIP Solver, v4.51
Parameter(s) specified in the command line:
--cover --clique --gomory --mir -m Modelo_canamod.mod -d Modelo_canamod.dat
```

```
Reading model section from Modelo_canamod.mod...
Modelo_canamod.mod:85: warning: final NL missing before end of file
85 lines were read
Reading data section from Modelo_canamod.dat...
Modelo_canamod.dat:54: warning: final NL missing before end of file
54 lines were read
Generating produtividade...
Generating Demanda...
Generating Fibra_inferior...
Generating Fibra_superior...
Generating Variedades...
Generating Areas...
Model has been successfully generated
GLPK Integer Optimizer, v4.51
89 rows, 300 columns, 1800 non-zeros
300 integer variables, all of which are binary
Preprocessing...
38 rows, 300 columns, 900 non-zeros
300 integer variables, all of which are binary
Scaling...
A: min|aij|= 2.134e-001 max|aij|= 5.318e+001 ratio = 2.491e+002
GM: min|aij|= 9.374e-001 max|aij|= 1.067e+000 ratio = 1.138e+000
EQ: min|aij|= 8.787e-001 max|aij|= 1.000e+000 ratio = 1.138e+000
2N: min|aij|= 4.269e-001 max|aij|= 1.662e+000 ratio = 3.893e+000
Constructing initial basis...
Size of triangular part is 38
Solving LP relaxation...
```

```
GLPK Simplex Optimizer, v4.51
38 rows, 300 columns, 900 non-zeros
* 0: obj = 4.177374630e+004 infeas = 4.252e+001 (0)
* 18: obj = 4.157733387e+004 infeas = 0.000e+000 (0)
* 43: obj = 4.551113401e+004 infeas = 0.000e+000 (0)
```

OPTIMAL SOLUTION FOUND

Integer optimization begins...

Gomory's cuts enabled

MIR cuts enabled

Cover cuts enabled

Clique cuts enabled

Creating the conflict graph...

The conflict graph has 2*300 vertices and 4875 edges

+ 43: mip = not found yet <= +inf (1; 0)

Cuts on level 0: mir = 26; clq = 9;

Cuts on level 15: mir = 26; clq = 9;

+ 811: >>>>> 4.539155430e+004 <= 4.544878690e+004 0.1% (16; 0)

Cuts on level 13: mir = 26; clq = 9;

+ 829: >>>>> 4.542720330e+004 <= 4.544878690e+004 < 0.1% (14; 2)

Cuts on level 20: gmi = 11; mir = 28; cov = 1; clq = 9;

+ 1093: >>>>> 4.543126410e+004 <= 4.544878690e+004 < 0.1% (11; 22)

Cuts on level 8: gmi = 3; mir = 29; clq = 11;

+ 1841: >>>>> 4.543140360e+004 <= 4.544092193e+004 < 0.1% (4; 80)

+ 1890: mip = 4.543140360e+004 <= tree is empty 0.0% (0; 93)

INTEGER OPTIMAL SOLUTION FOUND

Time used: 2.3 secs

Memory used: 0.9 Mb (994903 bytes)

Display statement at line 36

x[1,1].val = 0	x[5,2].val = 0	x[9,3].val = 0	x[13,4].val = 0
x[1,2].val = 0	x[5,3].val = 0	x[9,4].val = 0	x[13,5].val = 0
x[1,3].val = 0	x[5,4].val = 0	x[9,5].val = 0	x[13,6].val = 0
x[1,4].val = 1	x[5,5].val = 0	x[9,6].val = 0	x[13,7].val = 0
x[1,5].val = 0	x[5,6].val = 1	x[9,7].val = 0	x[13,8].val = 0
x[1,6].val = 0	x[5,7].val = 0	x[9,8].val = 0	x[13,9].val = 0
x[1,7].val = 0	x[5,8].val = 0	x[9,9].val = 0	x[13,10].val = 0
x[1,8].val = 0	x[5,9].val = 0	x[9,10].val = 0	x[13,11].val = 0
x[1,9].val = 0	x[5,10].val = 1	x[9,11].val = 0	x[13,12].val = 0
x[1,10].val = 0	x[5,11].val = 0	x[9,12].val = 0	x[14,1].val = 0
x[1,11].val = 0	x[5,12].val = 0	x[10,1].val = 0	x[14,2].val = 0
x[1,12].val = 0	x[6,1].val = 0	x[10,2].val = 0	x[14,3].val = 0
x[2,1].val = 0	x[6,2].val = 0	x[10,3].val = 0	x[14,4].val = 0
x[2,2].val = 0	x[6,3].val = 1	x[10,4].val = 0	x[14,5].val = 0
x[2,3].val = 0	x[6,4].val = 0	x[10,5].val = 0	x[14,6].val = 0
x[2,4].val = 0	x[6,5].val = 1	x[10,6].val = 0	x[14,7].val = 0
x[2,5].val = 0	x[6,6].val = 0	x[10,7].val = 0	x[14,8].val = 0
x[2,6].val = 0	x[6,7].val = 0	x[10,8].val = 0	x[14,9].val = 0
x[2,7].val = 0	x[6,8].val = 0	x[10,9].val = 0	x[14,10].val = 0
x[2,8].val = 0	x[6,9].val = 0	x[10,10].val = 0	x[14,11].val = 0
x[2,9].val = 0	x[6,10].val = 0	x[10,11].val = 0	x[14,12].val = 0
x[2,10].val = 0	x[6,11].val = 0	x[10,12].val = 1	x[15,1].val = 0
x[2,11].val = 0	x[6,12].val = 0	x[11,1].val = 0	x[15,2].val = 0
x[2,12].val = 0	x[7,1].val = 0	x[11,2].val = 0	x[15,3].val = 0
x[3,1].val = 0	x[7,2].val = 0	x[11,3].val = 0	x[15,4].val = 0
x[3,2].val = 0	x[7,3].val = 0	x[11,4].val = 0	x[15,5].val = 0
x[3,3].val = 0	x[7,4].val = 0	x[11,5].val = 0	x[15,6].val = 0
x[3,4].val = 0	x[7,5].val = 0	x[11,6].val = 0	x[15,7].val = 0
x[3,5].val = 0	x[7,6].val = 0	x[11,7].val = 0	x[15,8].val = 0
x[3,6].val = 0	x[7,7].val = 0	x[11,8].val = 0	x[15,9].val = 0
x[3,7].val = 0	x[7,8].val = 0	x[11,9].val = 0	x[15,10].val = 0
x[3,8].val = 0	x[7,9].val = 0	x[11,10].val = 0	x[15,11].val = 0
x[3,9].val = 0	x[7,10].val = 0	x[11,11].val = 0	x[15,12].val = 0
x[3,10].val = 0	x[7,11].val = 0	x[11,12].val = 0	x[16,1].val = 0
x[3,11].val = 0	x[7,12].val = 0	x[12,1].val = 0	x[16,2].val = 0
x[3,12].val = 0	x[8,1].val = 0	x[12,2].val = 0	x[16,3].val = 0
x[4,1].val = 0	x[8,2].val = 0	x[12,3].val = 0	x[16,4].val = 0
x[4,2].val = 0	x[8,3].val = 0	x[12,4].val = 0	x[16,5].val = 0
x[4,3].val = 0	x[8,4].val = 0	x[12,5].val = 0	x[16,6].val = 0
x[4,4].val = 0	x[8,5].val = 0	x[12,6].val = 0	x[16,7].val = 0
x[4,5].val = 0	x[8,6].val = 0	x[12,7].val = 0	x[16,8].val = 0
x[4,6].val = 0	x[8,7].val = 0	x[12,8].val = 0	x[16,9].val = 0
x[4,7].val = 0	x[8,8].val = 0	x[12,9].val = 0	x[16,10].val = 0
x[4,8].val = 0	x[8,9].val = 0	x[12,10].val = 0	x[16,11].val = 0
x[4,9].val = 0	x[8,10].val = 0	x[12,11].val = 0	x[16,12].val = 0
x[4,10].val = 0	x[8,11].val = 1	x[12,12].val = 0	x[17,1].val = 0
x[4,11].val = 0	x[8,12].val = 0	x[13,1].val = 0	x[17,2].val = 0
x[4,12].val = 0	x[9,1].val = 0	x[13,2].val = 0	x[17,3].val = 0
x[5,1].val = 0	x[9,2].val = 0	x[13,3].val = 0	x[17,4].val = 0

x[17,5].val = 0	x[21,6].val = 0	x[25,7].val = 0
x[17,6].val = 0	x[21,7].val = 0	x[25,8].val = 0
x[17,7].val = 1	x[21,8].val = 0	x[25,9].val = 0
x[17,8].val = 1	x[21,9].val = 0	x[25,10].val = 0
x[17,9].val = 0	x[21,10].val = 0	x[25,11].val = 0
x[17,10].val = 0	x[21,11].val = 0	x[25,12].val = 0
x[17,11].val = 0	x[21,12].val = 0	
x[17,12].val = 0	x[22,1].val = 0	
x[18,1].val = 0	x[22,2].val = 0	
x[18,2].val = 0	x[22,3].val = 0	
x[18,3].val = 0	x[22,4].val = 0	
x[18,4].val = 0	x[22,5].val = 0	
x[18,5].val = 0	x[22,6].val = 0	
x[18,6].val = 0	x[22,7].val = 0	
x[18,7].val = 0	x[22,8].val = 0	
x[18,8].val = 0	x[22,9].val = 0	
x[18,9].val = 0	x[22,10].val = 0	
x[18,10].val = 0	x[22,11].val = 0	
x[18,11].val = 0	x[22,12].val = 0	
x[18,12].val = 0	x[23,1].val = 0	
x[19,1].val = 1	x[23,2].val = 0	
x[19,2].val = 0	x[23,3].val = 0	
x[19,3].val = 0	x[23,4].val = 0	
x[19,4].val = 0	x[23,5].val = 0	
x[19,5].val = 0	x[23,6].val = 0	
x[19,6].val = 0	x[23,7].val = 0	
x[19,7].val = 0	x[23,8].val = 0	
x[19,8].val = 0	x[23,9].val = 0	
x[19,9].val = 1	x[23,10].val = 0	
x[19,10].val = 0	x[23,11].val = 0	
x[19,11].val = 0	x[23,12].val = 0	
x[19,12].val = 0	x[24,1].val = 0	
x[20,1].val = 0	x[24,2].val = 1	
x[20,2].val = 0	x[24,3].val = 0	
x[20,3].val = 0	x[24,4].val = 0	
x[20,4].val = 0	x[24,5].val = 0	
x[20,5].val = 0	x[24,6].val = 0	
x[20,6].val = 0	x[24,7].val = 0	
x[20,7].val = 0	x[24,8].val = 0	
x[20,8].val = 0	x[24,9].val = 0	
x[20,9].val = 0	x[24,10].val = 0	
x[20,10].val = 0	x[24,11].val = 0	
x[20,11].val = 0	x[24,12].val = 0	
x[20,12].val = 0	x[25,1].val = 0	
x[21,1].val = 0	x[25,2].val = 0	
x[21,2].val = 0	x[25,3].val = 0	
x[21,3].val = 0	x[25,4].val = 0	
x[21,4].val = 0	x[25,5].val = 0	
x[21,5].val = 0	x[25,6].val = 0	

 Produtividade máxima total obtida: 45431.52

 Demanda: 54.336

Valor demandado: 12.500

Fibras

i	Fibra_i	L.min	L.max
1	0.12	0.08	0.14
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.23	0.16	0.28
6	0.23	0.16	0.28
7	0.00	0.00	0.00
8	0.11	0.08	0.14
9	0.00	0.00	0.00
10	0.13	0.08	0.14
11	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00
17	0.23	0.16	0.28
18	0.00	0.00	0.00
19	0.23	0.16	0.28
20	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00
24	0.12	0.08	0.14
25	0.00	0.00	0.00

Restrição das variedades

j	x[i,j]
---	--------

1	1.00
2	1.00
3	1.00
4	1.00
5	1.00
6	1.00
7	1.00
8	1.00
9	1.00
10	1.00
11	1.00
12	1.00

Cobertura das áreas

i	Área_i
---	--------

1	50.36
2	0.00
3	0.00
4	0.00
5	59.97
6	58.82
7	0.00
8	51.93
9	0.00
10	22.67
11	0.00
12	0.00
13	0.00
14	0.00
15	0.00
16	0.00
17	51.91
18	0.00
19	54.87
20	0.00
21	0.00
22	0.00
23	0.00
24	49.64
25	0.00

Limite máximo para cobertura: 120.051

Model has been successfully processed