

DANIELLE DIAS SANT'ANNA MARTINS

**PROPOSTA DE MODELO PARA ANÁLISE DO MODAL RODO-
FERROVIÁRIO NO TRANSPORTE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO
TRIÂNGULO MINEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M379p
2014
Martins, Danielle Dias Sant'Anna, 1974-
Proposta de modelo para análise do modal
rodo-ferroviário no transporte da cana-de-açúcar no
Triângulo Mineiro / Danielle Dias Sant'Anna Martins. -
Viçosa, MG, 2014.
xviii, 164f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador : Ronaldo Perez.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.110-117.

1. Cana-de-Açúcar. 2. Transportes de mercadorias. 3.
Transportes - Custo operacional. 4. Logística empresarial.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Tecnologia de Alimentos. Programa de Pós-graduação em
Ciência e Tecnologia de Alimentos. II. Título.

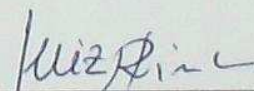
CDD 22. ed. 658.788

DANIELLE DIAS SANT'ANNA MARTINS


PROPOSTA DE MODELO PARA ANÁLISE DO MODAL RODO-FERROVIÁRIO NO TRANSPORTE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO TRIÂNGULO MINEIRO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

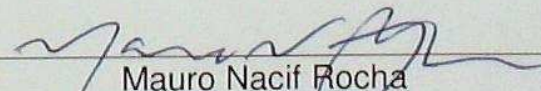
APROVADA: 30 de outubro de 2014.



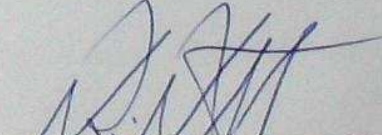
Luiz Ricardo Pinto



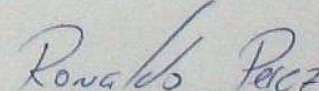
André Gustavo dos Santos



Mauro Nacif Rocha
(Coorientador)



Roberto Max Protil
(Coorientador)



Ronaldo Perez
(Orientador)

Ao Marcelo, marido e companheiro eterno
À Maria Eduarda, filha e minha vida
À Angela, mãe sempre presente

Dedico este sonho realizado.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ronaldo Perez, pelos ensinamentos, orientação e, principalmente, por exigir sempre o meu máximo enquanto estudante e pesquisadora.

Ao professor Mauro Nacif Rocha, pelos ensinamentos na área de programação matemática e pela ajuda constante.

Ao professor Roberto Max Protil, pela disponibilidade e conselhos acerca do trabalho. Aos professores André Gustavo dos Santos e Luiz Ricardo Pinto, pela participação e sugestões.

Às servidoras Geralda e Pollyana, secretárias do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, pela ajuda quanto à burocracia necessária e pela torcida.

Às Associações dos Fornecedores de Cana-de-Açúcar da mesorregião do Triângulo Mineiro que me responderam e à Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais, pela contribuição no desenvolvimento do trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Tecnologia de Alimentos, pelo ingresso no Curso de Doutorado, ao Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, pela liberação das minhas atividades acadêmicas, à Pró-Reitoria de Planejamento e Orçamento, pela compreensão quanto ao volume de atividades a cumprir, e à Diretoria de Material, por me dar apoio e continuar trabalhando, sem interrupções, mesmo nos meus momentos de estudo.

Ao meu esposo Marcelo, pelo companheirismo, paciência, e por ter uma habilidade incrível de levantar a minha auto-estima, lembrando-me sempre de que sou capaz. À minha filha Maria Eduarda, de 10 anos, por não demandar tanto a minha atenção nas atividades escolares, já que gosta de estudar, e por ter sido compreensiva quanto às minhas ausências nas brincadeiras diárias.

À minha mãe Angela, por vir de outra cidade todos os fins de semana para nos ver e ajudar, e por se orgulhar da profissão que escolhi. À minha irmã Michelle, que tanto torce por mim e se preocupa, mesmo à distância.

Ao meu saudoso Pai, exemplo de honestidade e trabalho, que sempre acreditou no meu potencial e na minha capacidade de conquistar sonhos através simplesmente do estudo.

À Deus e à Nossa Senhora Aparecida, cuja presença na minha vida é sentida, tamanha é a minha fé.

BIOGRAFIA

Danielle Dias Sant'Anna Martins, filha de Félix Fernandes Sant'Anna e Angela Maria de Sousa Dias, casada com Marcelo Feijó Martins e mãe de Maria Edurada Sant'Anna Martins, nasceu em Nova Iguaçu, estado do Rio de Janeiro, em 31 de maio de 1974.

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em julho de 1997, sendo que no dia 01 de novembro de 2000 obteve o título de Magister Scientiae pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Viçosa.

Ingressou como docente, Professora Assistente, do curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Viçosa em janeiro de 2003, estando desde 2011 no cargo de Diretora de Material da Instituição.

Em março de 2010, iniciou o Curso de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese, requisito indispensável para a obtenção do título de Doctor Scientiae, no dia 30 de outubro de 2014.

CONTEÚDO

LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO, PROCESSAMENTO E COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL	6
3.1 Os mercados produtor e processador de cana-de-açúcar	6
3.2 A colheita da cana	10
4. O TRANSPORTE DE CARGA E O SISTEMA FERROVIÁRIO NO BRASIL	12
4.1 A logística do transporte de carga	12
4.2 O transporte da cana	16
4.3 O sistema ferroviário	22
4.3.1 A rede ferroviária brasileira	22
5. ORIGEM E FERRAMENTAS DE PESQUISA OPERACIONAL	29
5.1 Técnicas de pesquisa operacional	30
5.2 Modelos de programação matemática como auxílio a decisões de transporte	32
6. METODOLOGIA	39
6.1 Modelo proposto	40

6.2	Plano experimental	46
6.2.1	Levantamento dos dados de entrada	46
6.2.1.1	Oferta e demanda de cana-de-açúcar	47
6.2.1.2	Distâncias e custos de transporte.....	51
6.2.1.3	Caminhões e terminais intermodais	56
6.2.1.4	Grupos de colheita	56
6.2.1.5	Qualidade da cana	60
6.2.1.6	Cenários de análise.....	64
7.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
7.1	A evolução do modelo proposto	74
7.2	Cenário 1	78
7.3	Cenário 2	78
7.4	Cenário 3	79
7.5	Cenário 4	89
7.6	Cenários 5, 6 e 7	98
7.7	Discussão geral dos cenários	102
8.	CONCLUSÃO	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
	APÊNDICES	118
	APÊNDICE A – MODELAGENS MATEMÁTICAS IMPLEMENTADAS NO SOFTWARE CPLEX.....	119
	APÊNDICE B – SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 1	129
	APÊNDICE C – SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 2	134
	APÊNDICE D – SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 3	139
	APÊNDICE E – SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 4	145
	APÊNDICE F – SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 5	150
	APÊNDICE G – SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 6	155
	APÊNDICE H – SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 7	159

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – TIPOS DE COMPOSIÇÕES DE TRANSPORTE DE CANA	19
QUADRO 2 – REPRESENTAÇÃO DE MODELOS DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA	32
QUADRO 3 – REPRESENTAÇÃO DE MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR	33
QUADRO 4 – REPRESENTAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO DE MODELOS DE TRANSPORTE	34
QUADRO 5 – REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA FUNÇÃO OBJETIVO APRESENTADA POR OLIVEIRA & CAIXETA-FILHO (2007).....	37
QUADRO 6 – REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA FUNÇÃO OBJETIVO APRESENTADA POR MILAN ET AL. (2006).....	38
QUADRO 7 – MUNICÍPIOS PRODUTORES DE CANA NO TRIÂNGULO MINEIRO.....	47
QUADRO 8 – USINAS PROCESSADORAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO.....	48
QUADRO 9 – ASSOCIADOS, ÁREA PLANTADA E RENDIMENTO MÉDIO DOS RESPECTIVOS MUNICÍPIOS ASSOCIADOS, E DESTINO DA CANA POR CADA ASSOCIAÇÃO, CONSIDERANDO A SAFRA 2012/2013	49
QUADRO 10 – OUTROS MUNICÍPIOS, ESTIMATIVAS DE ÁREA PLANTADA E RENDIMENTO MÉDIO, CONSIDERANDO A SAFRA 2012/2013	49
QUADRO 11 – CANAVIAIS, MUNICÍPIOS CORRESPONDENTES E QUANTIDADE PRODUZIDA POR CADA CANAVIAL, CONSIDERANDO A SAFRA 2012/2013	50
QUADRO 12 – USINAS, MOAGEM NA SAFRA 2012/2013 E QUANTIDADE MÁXIMA DE PROCESSAMENTO DIÁRIO	51
QUADRO 13 – DISTÂNCIAS FERROVIÁRIAS E RODOVIÁRIAS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, EM QUILÔMETROS	53
QUADRO 14 – CUSTOS FERROVIÁRIOS E CUSTOS RODOVIÁRIOS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, EM REAIS POR TONELADA TRANSPORTADA	55
QUADRO 15 – CAPACIDADE DE CARGA E DESCARGA DE CADA TERMINAL, CONSIDERANDO O TOTAL MOVIMENTADO E UMA PROJEÇÃO PARA A MOVIMENTAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR	56
QUADRO 16 – NÚMERO DE COLHEDORAS DISPONÍVEIS POR USINA COM A RESPECTIVA CAPACIDADE PRODUTIVA	57

QUADRO 17 – DISTÂNCIAS ENTRE OS CANAVIAIS, EM QUILOMETROS	58
QUADRO 18 – VALORES DE ATR DIVULGADOS PELO CONSECAN DO ESTADO DE SÃO PAULO NA SAFRA 2013/2014.....	61
QUADRO 19 – ATR NOS DIAS 1 E 7 DA SEMANA DE NÚMERO 10, EM QUILO DE AÇÚCAR POR TONELADA DE CANA.....	63
QUADRO 20 – DISTÂNCIAS E CUSTOS FERROVIÁRIOS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, EM QUILOMETROS E EM REAIS, RESPECTIVAMENTE, CONSIDERANDO A INCLUSÃO NO MODELO DO TERMINAL EFFL	66
QUADRO 21 – DISTÂNCIAS E CUSTOS RODOVIÁRIOS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, RESPECTIVAMENTE, CONSIDERANDO A INCLUSÃO NO MODELO DO TERMINAL EFFL	66
QUADRO 22 – DISTÂNCIAS FERROVIÁRIAS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, EM QUILOMETROS, CONSIDERANDO A INCLUSÃO NO MODELO DOS TERMINAIS EFAP, EFFA, EFCE, EFFB E EFDE	68
QUADRO 23 – CUSTOS FERROVIÁRIOS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, EM REAIS POR TONELADA TRANSPORTADA, CONSIDERANDO A INCLUSÃO NO MODELO DOS TERMINAIS EFAP, EFFA, EFCE, EFFB E EFDE	68
QUADRO 24 – DISTÂNCIAS RODOVIÁRIAS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, EM QUILOMETROS, CONSIDERANDO A INCLUSÃO NO MODELO DOS TERMINAIS EFAP, EFFA, EFCE, EFFB E EFDE	69
QUADRO 25 – CUSTOS RODOVIÁRIOS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, EM REAIS POR TONELADA TRANSPORTADA, CONSIDERANDO A INCLUSÃO NO MODELO DOS TERMINAIS EFAP, EFFA, EFCE, EFFB E EFDE	70
QUADRO 26 – VALORES INFERIORES E SUPERIORES DE ATR PARA O PRIMEIRO E SÉTIMO DIA DA SEMANA, CONSIDERANDO OS CENÁRIOS 5, 6 E 7, EM QUILO DE AÇÚCAR POR TONELADA DE CANHA	71
QUADRO 27 – RESUMO DAS PARTICULARIDADES DE CADA CENÁRIO ANALISADO	77
QUADRO 28 – VOLUME DE CANHA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE, CUSTO TOTAL E CUSTO POR TONELADA TRANSPORTADA NO TRECHO CANAVIAL-USINA PELO CENÁRIO 1 AO LONGO DE UMA SEMANA	78
QUADRO 29 – VOLUME DE CANHA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE, CUSTO TOTAL E CUSTO POR TONELADA TRANSPORTADA NO TRECHO CANAVIAL-USINA PELO CENÁRIO 2 AO LONGO DE UMA SEMANA	79
QUADRO 30 – ALOCAÇÃO POR TURNO DE TRABALHO, CONSIDERANDO O DESLOCAMENTO DA COLHEDORA ENTRE CANAVIAIS, ASSIM COMO A DISTÂNCIA ENTRE OS MESMOS, PELO CENÁRIO 3 NO PRIMEIRO DIA DE OPERAÇÃO.....	80
QUADRO 31 – ALOCAÇÃO POR TURNO DE TRABALHO, CONSIDERANDO O DESLOCAMENTO DA COLHEDORA ENTRE CANAVIAIS, ASSIM COMO A DISTÂNCIA ENTRE OS MESMOS, PELO CENÁRIO 3 NO QUINTO DIA DE OPERAÇÃO	81
QUADRO 32 – ALOCAÇÃO POR TURNO DE TRABALHO, CONSIDERANDO O DESLOCAMENTO DA COLHEDORA ENTRE CANAVIAIS, ASSIM COMO A DISTÂNCIA ENTRE OS MESMOS, PELO CENÁRIO 3 NO QUINTO DIA DE OPERAÇÃO	82
QUADRO 33 – ALOCAÇÃO POR TURNO DE TRABALHO, CONSIDERANDO O DESLOCAMENTO DA COLHEDORA ENTRE CANAVIAIS, ASSIM COMO A DISTÂNCIA ENTRE OS MESMOS, PELO CENÁRIO 3 NO SEXTO DIA DE OPERAÇÃO.....	82
QUADRO 34 – ALOCAÇÃO POR TURNO DE TRABALHO, CONSIDERANDO O DESLOCAMENTO DA COLHEDORA ENTRE CANAVIAIS, ASSIM COMO A DISTÂNCIA ENTRE OS MESMOS, PELO CENÁRIO 3 NO SÉTIMO DIA DE OPERAÇÃO	83
QUADRO 35 – VOLUME DE CANHA COLHIDA E ESCOADA POR CANAVIAL AO LONGO DA SEMANA, EM TONELADAS, PELO CENÁRIO 3.....	85

QUADRO 36 – VOLUME DE CANA RECEBIDA POR USINA AO LONGO DA SEMANA, EM TONELADAS, PELO CENÁRIO 3, ASSIM COMO A QUANTIDADE MÁXIMA PERMITIDA	86
QUADRO 37 – VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE, CUSTO TOTAL E CUSTO POR TONELADA TRANSPORTADA NO TRECHO CANAVIAL-USINA PELO CENÁRIO 3 AO LONGO DE UMA SEMANA	86
QUADRO 38 – DIFERENÇA DE ATR POR CANAVIAL SELECIONADO AO LONGO DA SEMANA, EM QUILO DE AÇÚCAR POR TONELADA DE CANA, PELO CENÁRIO 3	88
QUADRO 39 – CUSTOS FERROVIÁRIOS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, EM REAIS POR TONELADA TRANSPORTADA, CONSIDERANDO REDUÇÃO DE 50% NO VALOR DO FRETE PRATICADO E INCLUSÃO NO MODELO DOS TERMINAIS EFAP, EFFA, EFCF, EFFB E EFDE (CENÁRIO 4).....	89
QUADRO 40 – CUSTOS RODOVIÁRIOS, ENTRE A ORIGEM I E O DESTINO J, EM REAIS POR TONELADA TRANSPORTADA, CONSIDERANDO A INCLUSÃO NO MODELO DOS TERMINAIS EFAP, EFFA, EFCF, EFFB E EFDE	90
QUADRO 41 – VOLUME DE CANA RECEBIDA POR TERMINAL FERROVIÁRIO AO LONGO DA SEMANA, EM TONELADAS, PELO CENÁRIO 4, ASSIM COMO A QUANTIDADE MÁXIMA PERMITIDA.....	91
QUADRO 42 – MODAL UTILIZADO, VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE E CUSTO TOTAL NO TRECHO AG1-U1 PELO CENÁRIO 3 NO TERCEIRO DIA DE OPERAÇÃO.....	91
QUADRO 43 – MODAL UTILIZADO, VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE E CUSTO TOTAL NO TRECHO AG1-U1 PELO CENÁRIO 4 NO TERCEIRO DIA DE OPERAÇÃO.....	91
QUADRO 44 – VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE, CUSTO TOTAL E CUSTO POR TONELADA TRANSPORTADA NO TRECHO CANAVIAL-USINA PELO CENÁRIO 4 AO LONGO DE UMA SEMANA	92
QUADRO 45 – SEMANA ANALISADA PARA COLHEITA, TERMINAIS FERROVIÁRIOS, PERCENTUAL DOS CUSTOS FERROVIÁRIOS, VOLUME E CUSTOS ENVOLVIDOS NO ESCOAMENTO DA CANA NOS CENÁRIOS 1, 2, 3, E 4 AO LONGO DE UMA SEMANA.....	93
QUADRO 46 – VOLUME DE CANA RECEBIDA POR TERMINAL FERROVIÁRIO AO LONGO DA SEMANA, EM TONELADAS, CONSIDERANDO UMA REDUÇÃO DE 80% DOS CUSTOS FERROVIÁRIOS, ASSIM COMO A QUANTIDADE MÁXIMA PERMITIDA.....	94
QUADRO 47 – DISTÂNCIAS RODOVIÁRIAS E RODO-FERROVIÁRIAS ENTRE O TRECHO CANAVIAL-USINA INDICADO COMO SOLUÇÃO, CONSIDERANDO UMA REDUÇÃO DE 80% DO FRETE FERROVIÁRIO.....	97
QUADRO 48 – CUSTOS RODOVIÁRIOS E RODO-FERROVIÁRIOS ENTRE O TRECHO CANAVIAL-USINA INDICADO COMO SOLUÇÃO, CONSIDERANDO UMA REDUÇÃO DE 80% DO FRETE FERROVIÁRIO.....	97
QUADRO 49 – MODAL UTILIZADO, VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE E CUSTO TOTAL NO TRECHO AG1-U1 PELO CENÁRIO 5 NO QUARTO DIA DE OPERAÇÃO	99
QUADRO 50 – MODAL UTILIZADO, VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE E CUSTO TOTAL NO TRECHO AG1-U1 PELO CENÁRIO 6 NO TERCEIRO DIA DE OPERAÇÃO.....	99
QUADRO 51 – MODAL UTILIZADO, VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE E CUSTO TOTAL NO TRECHO AG1-U1 PELO CENÁRIO 7 NO SEGUNDO DIA DE OPERAÇÃO	99
QUADRO 52 – VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE, CUSTO TOTAL E CUSTO POR TONELADA TRANSPORTADA NO TRECHO CANAVIAL-USINA PELO CENÁRIO 5 AO LONGO DE UMA SEMANA	100

QUADRO 53 – VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE, CUSTO TOTAL E CUSTO POR TONELADA TRANSPORTADA NO TRECHO CANAVIAL-USINA PELO CENÁRIO 6 AO LONGO DE UMA SEMANA	100
QUADRO 54 – VOLUME DE CANA TRANSPORTADO, CUSTO DE TRANSPORTE, CUSTO DE PENALIDADE, CUSTO TOTAL E CUSTO POR TONELADA TRANSPORTADA NO TRECHO CANAVIAL-USINA PELO CENÁRIO 7 AO LONGO DE UMA SEMANA	100
QUADRO 55 – SEMANA ANALISADA PARA COLHEITA, TERMINAIS FERROVIÁRIOS, PERCENTUAL DOS CUSTOS FERROVIÁRIOS, VOLUME E CUSTOS ENVOLVIDOS NO ESCOAMENTO DA CANA NOS CENÁRIOS 4, 5, 6 E 7 AO LONGO DE UMA SEMANA	101
QUADRO 56 – RESUMO DAS PARTICULARIDADES E RESULTADO DE CADA CENÁRIO ANALISADO	103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DA ÁREA E PRODUTIVIDADE DA CANA ENTRE AS SAFRAS 2005-2006 A 2011-2012.	7
FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL E AÇÚCAR ENTRE AS SAFRAS 2006-2007 A 2012-2013.	7
FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS PRODUTORAS DE CANA NO TRIÂNGULO MINEIRO.	8
FIGURA 4 – IMAGENS DEMONSTRATIVAS DO CARREGAMENTO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM VAGÕES FERROVIÁRIOS.	18
FIGURA 5 – DESCARREGAMENTO DA CANA POR BÁSCULA LATERAL.	21
FIGURA 6 – MAPA DA FERROVIA CENTRO ATLÂNTICA.	26
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS MUNICÍPIOS E USINAS CONSIDERADOS NA COLETA DE DADOS, DOS TERMINAIS FERROVIÁRIOS EXISTENTES, E DAS MALHAS FERROVIÁRIAS CONSTRUÍDAS, PLANEJADAS E PROJETADA NA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO E PROXIMIDADES.	52
FIGURA 8 – CURVA DE RENDIMENTO MENSAL DO ATR, EXPRESSO EM KG POR TONELADA DE CANA, PARA A REGIÃO DE MINAS GERAIS NA SAFRA 2013/2014.	61
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CENÁRIO 2.	65
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CENÁRIO 3.	67
FIGURA 11 – PARTE INICIAL DA MODELAGEM MATEMÁTICA IMPLEMENTADA NO SOFTWARE CPLEX.	74
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO RESULTADO PARA REDUÇÃO DE 80% NOS FRETES FERROVIÁRIOS PARA O PRIMEIRO DIA DE OPERAÇÃO.	95
FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO RESULTADO PARA REDUÇÃO DE 80% NOS FRETES FERROVIÁRIOS PARA O SEGUNDO DIA DE OPERAÇÃO.	95
FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO RESULTADO PARA REDUÇÃO DE 80% NOS FRETES FERROVIÁRIOS PARA O TERCEIRO DIA DE OPERAÇÃO.	96

LISTA DE ABREVIATURAS

ATR	Açúcar Total Recuperável
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
EFBA	Estação Ferroviária de Brejo Alegre
EFAr	Estação Ferroviária de Araguari
EFUd	Estação Ferroviária de Uberlândia
EFUb	Estação Ferroviária de Uberaba
EFFL	Estação Ferroviária de Frutal
EFAP	Estação Ferroviária de Araporã
EFFA	Estação Ferroviária de Frutal A
EFFB	Estação Ferroviária de Frutal B
EFFC	Estação Ferroviária de Campo Florido
EFDE	Estação Ferroviária de Delta
PL1	Canavial no município de Planura (Aglomerção 1)
FN1	Canavial no município de Fronteira (Aglomerção 1)
AR1	Canavial no município de Araporã (Aglomerção 1)
CN1	Canavial no município de Centralina (Aglomerção 1)
CA1	Canavial no município de Conceição das Alagoas (Aglomerção 1)
CA2	Canavial no município de Conceição das Alagoas (Aglomerção 2)
UB1	Canavial no município de Uberaba (Aglomerção 1)
UB2	Canavial no município de Uberaba (Aglomerção 2)
CF1	Canavial no município de Campo Florido (Aglomerção 1)
CF2	Canavial no município de Campo Florido (Aglomerção 2)
PJ1	Canavial no município de Pirajuba (Aglomerção 1)
PT1	Canavial no município de Prata (Aglomerção 1)
PT2	Canavial no município de Prata (Aglomerção 2)
FL1	Canavial no município de Frutal (Aglomerção 1)
FL2	Canavial no município de Frutal (Aglomerção 2)
CG1	Canavial no município de Comendador Gomes (Aglomerção 1)
CG2	Canavial no município de Comendador Gomes (Aglomerção 2)

CQ1	Canavial no município de Conquista (Aglomerção 1)
UD1	Canavial no município de Uberlândia (Aglomerção 1)
MA1	Canavial no município de Monte Alegre de Minas (Aglomerção 1)
TG1	Canavial no município de Tupaciguara (Aglomerção 1)
AG1	Canavial no município de Araguari (Aglomerção 1)
VR1	Canavial no município de Veríssimo (Aglomerção 1)
VR2	Canavial no município de Veríssimo (Aglomerção 2)
DE1	Canavial no município de Delta (Aglomerção 1)
AC1	Canavial no município de Água Comprida (Aglomerção 1)
AC2	Canavial no município de Água Comprida (Aglomerção 2)
U1	Usina 1
U2	Usina 2
U3	Usina 3
U4	Usina 4
U5	Usina 5

RESUMO

MARTINS, Danielle Dias Sant'Anna, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2014. **Proposta de modelo para análise do modal rodo-ferroviário no transporte da cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro.** Orientador: Ronaldo Perez. Coorientadores: Mauro Nacif Rocha e Roberto Max Protil.

Atualmente, o Brasil ocupa uma posição de destaque no cenário internacional como maior produtor de cana-de-açúcar, sendo o estado de Minas Gerais, especificamente a mesorregião do Triângulo Mineiro, apontada como área de expansão do setor canavieiro e sucroalcooleiro. Os grandes volumes de cana-de-açúcar movimentados pelo sistema viário contribuem conseqüentemente para níveis elevados de complexidade nas decisões relacionadas ao planejamento e programação das atividades de colheita e escoamento da matéria-prima. Apesar de quase toda a cana movimentada no país acontecer pelo modal rodoviário, em virtude do processo atual de incentivo das privatizações do setor ferroviário brasileiro, por parte do governo federal, a alternativa de transporte rodo-ferroviária passa a se configurar como tema interessante de estudos. Dessa forma, realizou-se no presente trabalho a formulação de um modelo de programação linear inteira mista para avaliar, num horizonte de tempo de sete dias de colheita, a utilização do modal rodo-ferroviário no deslocamento da cana das propriedades rurais às respectivas usinas processadoras na região do Triângulo Mineiro. Além da programação do veículo de transporte, propõe-se a programação do grupo de corte a ser usado na colheita, de modo que os custos de transporte sejam minimizados e a qualidade da

matéria-prima seja maximizada. Para a avaliação do modelo matemático, sete cenários hipotéticos para a região do Triângulo foram simulados e analisados, sendo adotada como premissa a concentração da oferta e da demanda de cana-de-açúcar: i) Cenário 1 - Quatro terminais ferroviários existentes – Estação Ferroviária de Uberaba, Estação Ferroviária de Uberlândia, Estação Ferroviária de Araguari e Estação Ferroviária de Brejo Alegre – e planejamento de colheita no meio da safra; ii) Cenário 2 - Cinco terminais ferroviários (quatro terminais existentes e construção de um terminal na cidade de Frutal – Estação Ferroviária de Frutal), e planejamento de colheita no meio da safra; iii) Cenário 3 - Nove terminais ferroviários (quatro terminais existentes e construção de terminais em cada uma das cinco usinas analisadas – Estação Ferroviária de Araporã na Usina 1, Estação Ferroviária de Frutal A na Usina 2, Estação Ferroviária de Campo Florido na Usina 3, Estação Ferroviária de Frutal B na Usina 4 e Estação Ferroviária de Delta na Usina 5), e planejamento de colheita no meio da safra; iv) Cenário 4 - similar ao cenário 3, porém considerando uma redução de 50% dos custos ferroviários; v) Cenário 5 - similar ao cenário 4, porém considerando a colheita no início da safra; vi) Cenário 6 - similar ao cenário 4, porém considerando a colheita no final da safra; e vii) Cenário 7 - similar ao cenário 4, porém considerando uma variação superestimada para o rendimento de Açúcar Total Recuperável (ATR) no meio da safra. Os resultados mostram a alocação de cada grupo de colheita por turno de trabalho, e indicam a utilização do modal rodoviário no escoamento da cana-de-açúcar para todos, ou quase todos, os dias analisados em cada cenário. Quanto ao planejamento da colheita, o modelo não apresentou diferenças significativas para análises no início, no meio e no final da safra. Nos cenários em que houve aumento de terminais ferroviários instalados na região, e da respectiva malha ferroviária de ligação, juntamente com a adoção da redução significativa do frete ferroviário praticado pelas concessionárias, constatou-se como solução ótima a utilização rodo-ferroviária para o escoamento da cana oriunda de alguns canaviais, em alguns dias da semana. Apesar da indicação do uso da modalidade rodo-ferroviária nestes cenários, quando se analisa o indicador custo unitário da tonelada da cana movimentada ao longo da semana, verifica-se um valor não muito diferente do apresentado pelos demais cenários em estudo. Dessa forma, conclui-se que os resultados não são suficientes para justificar investimentos no sistema ferroviário para a movimentação da cana-de-açúcar na região do Triângulo Mineiro, o que pode ser explicado pelos baixos valores do frete rodoviário adotados no país, quando comparados à média do frete ferroviário, uma inversão do que se é observado em países com melhores práticas em logística.

ABSTRACT

MARTINS, Danielle Dias Sant'Anna, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2014. **Proposed model for analysis of road-rail modal in the transport of sugarcane in Triângulo Mineiro.** Adviser: Ronaldo Perez. Co-Advisers: Mauro Nacif Rocha and Roberto Max Protil.

Currently, Brazil occupies a prominent position in the international arena as the largest producer of cane sugar, and the state of Minas Gerais, specifically the middle region of the Triângulo Mineiro, identified as expansion area of sugarcane and sugarcane sector. The large volumes of cane sugar moved by road system consequently contribute to high levels of complexity in decisions related to planning and programming of the harvesting and transportation of raw materials. Although almost all busy cane in the country happen by road, due to the current process of encouraging privatization of the Brazilian railway sector, the federal government, the road-rail transport alternative appears to be configured as interesting topic of study. Thus, there was in this work to formulate a mixed integer linear programming model to assess in a time horizon of seven days of harvest, the use of road-rail modal displacement of cane from the farms to their processing plants in the Triângulo Mineiro region. In addition to the transport vehicle programming cutting group programming is proposed to be used in the collection, so that transport costs are minimized and the quality of raw materials is maximized. For the evaluation of the mathematical model, seven hypothetical scenarios for the Triângulo region were simulated and analyzed, adopted premised on the concentration

of supply and demand for cane sugar: i) Scenario 1 - Four existing rail terminals – Uberaba Railway Station, Uberlândia Railway Station, Araguari Railway Station and Brejo Alegre Railway Station - and harvest planning in the middle of the harvest; ii) Scenario 2 - Five rail terminiais (four existing terminals and construction of a terminal in the city of Frutal - Frutal Railway Station), and crop planning in the middle of the harvest; iii) Scenario 3 - Nine railway terminals (four existing terminals and the construction of terminals in each of the five plants studied - Araporã Railway Station in Plant 1, Frutal A Railway Station in Plant 2, Campo Florido Railway Station in Plant 3, Frutal B Railway Station in Plant 4 and Delta Railway Station in Plant 5), and crop planning in the middle of the harvest; iv) Scenario 4 - similar to scenario 3, but assuming a 50% reduction in rail costs; v) Scenario 5 - similar to scenario 4, but considering the harvest at the beginning of the harvest; vi) Scenario 6 - similar to scenario 4, but considering the harvest at the end of the harvest; and vii) Scenario 7 - similar to scenario 4, but considering an overrated variation for the yield of Total Recoverable Sugar in the middle of harvest. The results show the allocation of each group of harvest per shift, and indicate the use of road transport in transporting cane sugar for all, or nearly all, the days analyzed in each scenario. In planning the harvest, the model showed no significant differences for analysis at the start, middle and end of the season. In scenarios where there was an increase of railway terminals installed in the region, and its connecting rail network, along with the adoption of a significant reduction in rail freight practiced by the concessionaires, it was found as optimal solution to road and rail use for transporting the cane coming from some cane fields, on some days of the week. Despite the indication of the use of road and rail mode in these scenarios, when analyzing the indicator unit cost per ton of cane busy throughout the week, there is a value not very different than the one by the other scenarios under study. Thus, it is concluded that the results are not sufficient to justify investments in the railway system for the movement of cane sugar in the Triângulo Mineiro region, which can be explained by the low values of road freight adopted in the country, when compared the average rail freight, a reversal of what is observed in countries with best practices in logistics.

1. INTRODUÇÃO

A cadeia agroindustrial da cana-de-açúcar cresce de forma acelerada, mantendo o Brasil numa posição de destaque, tanto do ponto de vista econômico, quanto social e tecnológico. O segmento industrial é formado por usinas que produzem açúcar e/ou álcool, originando coprodutos como bagaço (geração de energia), xaropes, torta de filtro, vinhaça concentrada e melaço.

Segundo a UNICA (2012), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido pela Índia, Tailândia e Austrália, os quais, juntos, apresentam volume de produção próximo ao total produzido no Brasil. De acordo com a CONAB (2014), a moagem de cana na safra 2013/2014 foi de 658,8 milhões de toneladas, valor 12% superior à safra 2012/2013, que foi de 588,9 milhões de toneladas de cana. Para 2014/2015, estima-se uma produção de 616,5 milhões de toneladas, representando uma queda de aproximadamente 6,5% em relação à safra atual, resultado principalmente do clima adverso e da política governamental de preços que favorece o consumo da gasolina (RURALBR, 2014).

Quanto à distribuição espacial da área cultivada de cana no país, constata-se que a região Centro-Sul vem contribuindo, em média, com cerca de 90% da produção total anual, restando uma representatividade de 10% para a região Norte-Nordeste, conforme dados estatísticos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2013a). O estado de São Paulo, por sua vez, é onde se concentra a maior parcela de área

ocupada, responsabilizando-se por cerca de 56% da produção total na safra 2012/2013. As demais zonas produtoras são, em ordem decrescente de representatividade, Paraná, Triângulo Mineiro e Zona da Mata Nordestina.

Ao se analisar a área de expansão do setor canavieiro e sucroalcooleiro do Estado de Minas Gerais, tem-se a mesorregião do Triângulo Mineiro como a mais significativa. Este processo é consequência da qualidade de suas terras, do valor menor destas em relação a outras regiões, como o interior de São Paulo, e da sua localização estratégica, que possibilita o rápido escoamento da produção e oferta de força de trabalho, o que vem atraindo novos investimentos por parte de grupos econômicos de outras regiões do país e do exterior frente aos interesses da ampliação da produção de açúcar e álcool para exportação e atendimento do mercado mineiro (PREVITALLI et al., 2010). Segundo especialistas do setor canavieiro, as propriedades de cana no Triângulo Mineiro ficam num raio de aproximadamente 25 km das usinas (SECTES, 2011).

A expectativa de aumentos na produção de etanol e açúcar resulta, necessariamente, em expansão das áreas cultivadas com cana-de-açúcar e, conseqüentemente, em grandes movimentações no sistema viário do país. Tal fato aumenta a complexidade nas decisões por novos canaviais e na programação do escoamento da produção, implicando em busca por soluções logísticas no corte, carregamento e transporte da matéria-prima.

Os sistemas logísticos são, portanto, fundamentais para tornar a integração da cadeia possível, permitindo operar com custos e tempos adequados (BALLOU, 2006). Um dos grandes desafios nesses sistemas é como coordenar as atividades relacionadas ao escoamento de cana do campo até a área industrial, de maneira a suprir adequadamente a demanda necessária.

De acordo com a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP, 2010), o custo do frete para transporte rodoviário e ferroviário pago no Brasil em 2010 era de, respectivamente, US\$51,75 e US\$74,67 a tonelada por quilômetro útil, enquanto os países com melhores práticas de logística pagavam, respectivamente, US\$14 e US\$4,76 a tonelada por quilômetro útil. Esta pesquisa releva uma defasagem do Brasil em 73% para o setor rodoviário, e em 94% para o setor ferroviário. Além disso, constata-se uma inversão no cenário brasileiro, onde os menores custos são praticados pelo modal rodoviário, e não pelo ferroviário.

Quanto aos custos das operações de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar, estes representam 30% do custo de produção da matéria-prima, sendo as

atividades relacionadas ao transporte responsáveis por 12% deste total (CAIXETA-FILHO, 2004). Estas operações, por sua vez, são realizadas, quase na sua totalidade, a partir do modal rodoviário (AGEITEC, 2013). No Brasil, não há utilização do modal ferroviário para transporte de cana-de-açúcar por nenhuma usina. Quanto ao modal hidroviário, as usinas localizadas na margem da Hidrovia Tietê-Paraná já utilizam embarcações para o transporte de cana (TERRA, 2013a).

Nos Estados Unidos e Austrália, porém, usinas de açúcar utilizam ferrovias para o transporte da matéria-prima às suas unidades de beneficiamento (HIGGINS & DAVIES, 2005; NEUNGMATCHA et al., 2013), similar ao modelo que é adotado na Nova Zelândia, mas com uma matéria-prima diferente, o leite (LAIRD, 2013). Em Cuba, o deslocamento de cana das áreas produtoras às usinas foi estudado por Milan et al. (2006), que apresentou um modelo de programação linear inteira mista para determinar a capacidade ótima diária de transporte por rodovia e por ferrovia. Nesses casos, toda a coleta é realizada por caminhões que concentram o produto em pólos, de onde é transportado via ferrovia até as indústrias.

Neste contexto, evidencia-se a necessidade de se analisar o potencial de inserção de novos modais de transporte que auxiliem no escoamento da cana-de-açúcar dos canaviais, mas que não onere a cadeia produtiva com desperdícios e custos elevados, possibilitando novas opções de operações das unidades.

As novas transformações ocorridas na cadeia agroindustrial da cana aliada à relevância econômica para o Brasil e à dinamização que vem sendo provocada no estado de Minas Gerais pelos investimentos realizados na região do Triângulo Mineiro, justificam a relevância de se desenvolverem mais estudos nesta região. Em virtude da possibilidade de existência de muitas restrições existentes entre cada origem-destino possível, a programação matemática, técnica de pesquisa operacional, surge como uma ferramenta valiosa na obtenção do resultado ótimo em decisões de transporte. Outras metodologias poderiam ser aplicadas para solucionar esse tipo de problema, como a simulação computacional ou os métodos heurísticos, não sendo gerado, contudo, soluções ótimas, e sim soluções boas.

Portanto, com o intuito de auxiliar a tomada de decisão quanto à movimentação de cana-de-açúcar dos canaviais às usinas na região do Triângulo Mineiro, o presente trabalho pretende avaliar, a partir da aplicação de um modelo de programação linear inteira mista, a utilização do modal ferroviário em complementação ao modal rodoviário existente, de modo que os custos de transporte sejam minimizados e a qualidade da matéria-prima seja maximizada.

Com relação à estrutura, além desta introdução, o trabalho é constituído por mais seis tópicos. No tópico 2, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo. Os tópicos 3, 4 e 5 são compostos, respectivamente, por uma revisão de literatura sobre os temas oferta, processamento e colheita da cana-de-açúcar, o transporte de carga e o modal ferroviário brasileiro, e a origem e ferramentas de pesquisa operacional. A metodologia para alcançar os objetivos propostos é detalhada no tópico 6. O tópico 7 mostra e discute os resultados do trabalho, cujas conclusões são expostas no tópico 8.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um modelo de programação matemática para avaliar a utilização do modal ferroviário no transporte de cana-de-açúcar dos canaviais às usinas processadoras na região do Triângulo Mineiro.

Especificamente, pretende-se:

- a) Descrever o sistema atual de colheita da cana, que compreende as operações de corte, carregamento, transporte e recepção;
- b) Propor a integração da cadeia a partir do uso do sistema ferroviário em complementação ao sistema rodoviário existente;
- c) Determinar a programação do veículo de transporte e do grupo de corte a ser usado na colheita, considerando a captação da cana-de-açúcar nos canaviais e posterior movimentação às respectivas unidades processadoras, de modo que os custos de transporte sejam minimizados e a qualidade da matéria-prima seja mantida.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO, PROCESSAMENTO E COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

3.1 Os mercados produtor e processador de cana-de-açúcar

A cultura da cana está presente em quase todos os estados brasileiros e ocupa cerca de 9% da superfície agrícola do país, sendo, depois da soja e do milho, o terceiro cultivo mais importante quando se considera a área ocupada (BNDES & CGEE, 2008).

A produção de cana-de-açúcar da região Norte/Nordeste (safra de setembro a março) caracteriza-se, de um modo geral, pela baixa produtividade e altos custos, enquanto a região Centro/Sul (safra de maio a dezembro) é caracterizada por alta produtividade e menores custos de produção, com considerável potencial de expansão (COSTA & BURNQUIST, 2003). Apesar dessas especificidades regionais, a existência de duas regiões produtoras de cana possibilita que haja um fornecimento anual contínuo de açúcar e álcool ao mercado consumidor brasileiro.

No setor sucroalcooleiro brasileiro, a flexibilidade em se produzir açúcar e/ou álcool é uma das características mais marcantes, permitindo que os produtores, na busca por maior produtividade, redirecionem suas atividades em função das variações na curva de oferta e demanda dos respectivos produtos finais (SIQUEIRA, 2004).

As usinas brasileiras podem, portanto, ser classificadas da seguinte maneira: i) usinas de açúcar, que produzem exclusivamente açúcar; ii) usinas de açúcar com destilarias anexas, que produzem açúcar e bioetanol; e iii) usinas que só produzem bioetanol, ou destilarias autônomas. A grande maioria das instalações é formada por usinas de açúcar com destilarias anexas (cerca de 60% do total), seguidas por um considerável montante de destilarias autônomas (cerca de 35%) e por algumas unidades de processamento exclusivo de açúcar (BNDES & CGEE, 2008).

Quanto à origem da matéria-prima adquirida pelas usinas, tem-se que, em média, 80% da cana é proveniente de terras próprias e arrendadas ou de acionistas e companhias agrícolas com alguma vinculação às usinas, enquanto que os 20% restantes são fornecidos por pequenos produtores independentes que produzem cana entre outros produtos agropecuários para fins econômicos e de consumo próprio, geralmente contando com o suporte tecnológico das usinas (BNDES & CGEE, 2008).

Nos últimos anos, a produção de cana, álcool e açúcar no Brasil passou por uma grande expansão na sua capacidade, em virtude, principalmente, da retomada do Projeto Proálcool (SCHMIDT JÚNIOR, 2011). Como pode ser constatado pela Figura 1, de 2005/2006 a 2011/2012 houve um elevado crescimento na área plantada (43%), cuja produtividade apresentou crescimento inexpressivo de apenas 2%, caracterizada pelo acréscimo de 24%, de 2005/2006 a 2009/2010, e decréscimo de 18%, de 2009/2010 a 2011/2012. Diversos fatores conjunturais podem explicar tal queda, como a baixa renovação de canaviais e as adversidades climáticas verificadas, como o excesso de chuvas. Na Figura 2, observa-se um crescimento tanto na produção de álcool (31%) quanto na produção de açúcar (25%), entre as safras de 2006/2007 e 2012/2013.

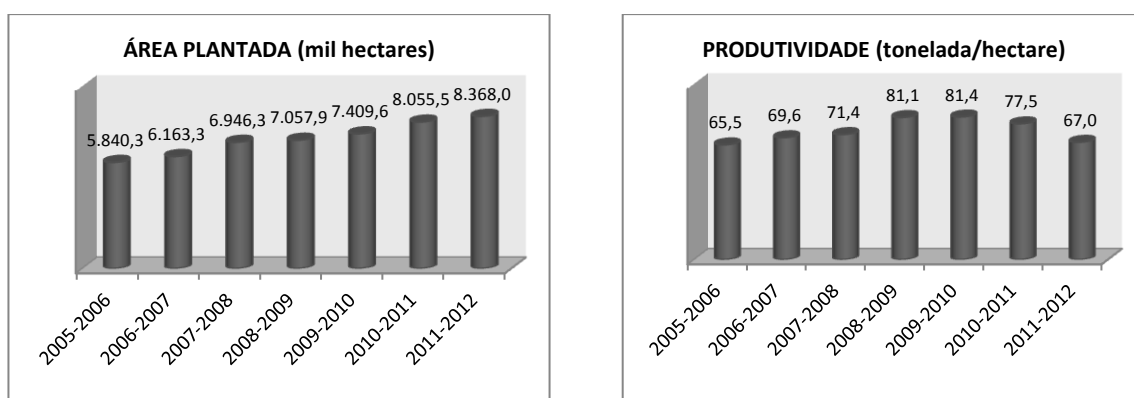


Figura 1 – Evolução da área e produtividade da cana entre as safras 2005-2006 a 2011-2012.

Fonte: MAPA (2013b)

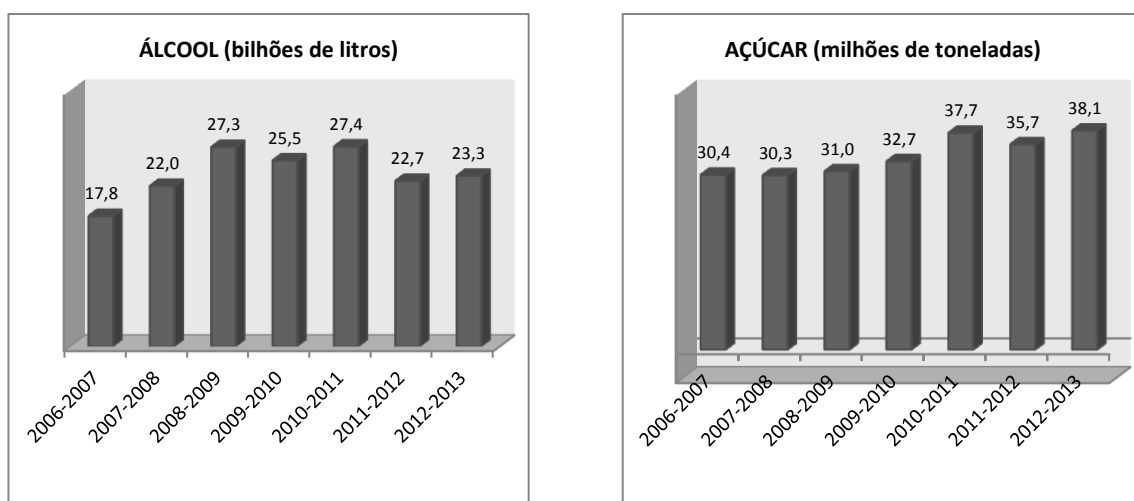


Figura 2 – Evolução da produção de álcool e açúcar entre as safras 2006-2007 a 2012-2013.

Fonte: Adaptado de MAPA (2013a)

A expansão da demanda do etanol de cana-de-açúcar no Brasil, considerando a influência dos condicionantes envolvidos e os conseqüentes impactos, necessidades e alternativas futuras na logística de distribuição, foi analisada por Mitsutani (2010). Mais especificamente, foram estudadas a situação da demanda, produção e distribuição do álcool no Brasil e no mundo e a situação da infra-estrutura da logística do etanol no Brasil, seja nos modais rodoviário, ferroviário, hidroviário ou dutoviário. Além disso, foi desenvolvida uma modelagem conceitual de como os condicionantes envolvidos na temática (agentes econômicos, tecnológicos, socioambientais, políticos) interagem entre si e impactam positivamente e negativamente na demanda de etanol brasileiro, sendo gerados cenários a partir desta modelagem.

O Estado líder no setor sucroalcooleiro nacional é São Paulo que, além de se destacar nos avanços tecnológicos e de produtividade, também se constitui como a principal região produtora da cultura, com uma produção de 54,4% na safra 2011/2012 (UNICA, 2013). No mesmo período, ainda de acordo com a UNICA (2013), outros Estados tiveram produções significativas, como Minas Gerais (8,9%), Goiás (8,1%), Paraná (7,2%) e Mato Grosso do Sul (6,0%).

Minas Gerais ocupa, portanto, o segundo lugar entre os maiores produtores de cana do Brasil, produção essa que se concentra, principalmente, na região do Triângulo Mineiro. Na Figura 3, é apresentado o mapa da região do Triângulo, com destaque para as áreas produtoras de cana-de-açúcar.

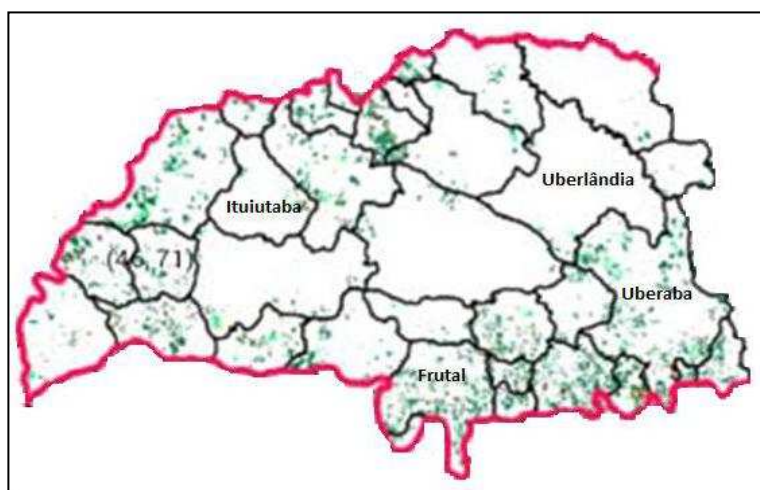


Figura 3 – Distribuição das áreas produtoras de cana no Triângulo Mineiro.
Fonte: CANASAT (2013)

De acordo com os números do IBGE (2013b), a região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba apresentou um crescimento considerável (349%) no volume de cana produzido entre os anos 2001 a 2011. Especificamente com relação ao Triângulo

Mineiro, estima-se para a safra 2013/2014 uma colheita superior a 3 milhões de toneladas, que serão transformadas em 5,6 milhões de sacas de 50 quilos e 92 milhões de litros de álcool, tendência de alta na produção que deve ser mantida na safra seguinte (JORNALCANA, 2013).

Ressalta-se ainda que a expansão da produção sucroalcooleira vem sendo acompanhada de processo crescente de fusões e aquisições que estão implicando na internacionalização do setor. O processamento atual de cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro acontece em 22 unidades industriais, sendo 16 unidades mistas (açúcar e etanol), 5 unidades produtoras de açúcar e 1 unidade produtora de etanol (MAPA, 2011), sendo que o investimento mínimo necessário para a implementação de cada usina gira em torno de 100 milhões de reais, conforme o SINDAÇUCAR-MG (2003).

Diversos foram os estudos que abordaram o desenvolvimento da cadeia produtiva da cana-de-açúcar na região do Triângulo Mineiro, como relatado nos trabalhos de SECTES (2011), Carvalho (2009) e Siqueira (2004).

A competitividade da agroindústria de açúcar e de álcool nas regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba foi analisada por Siqueira (2004), mediante a identificação dos fatores favoráveis e desfavoráveis ao desenvolvimento da agroindústria. Concluiu-se que o determinante insumo vem sendo bastante favorável para a competitividade das usinas e destilarias da região, em virtude principalmente da disponibilidade de matéria-prima, enquanto que os determinantes estrutura e relação de mercado vem se apresentando neutro na competitividade, devido principalmente à concorrência com as unidades processadoras de suínos e com as destilarias paulistas, além de dificuldades com alguns elementos da cadeia sucroalcooleira.

A partir de entrevistas realizadas junto a dirigentes e representantes de usinas e associações de produtores de cana-de-açúcar, SECTES (2011) estudou o desenvolvimento da cadeia de insumos do arranjo produtivo local de etanol no Triângulo Mineiro. Foram analisados os aspectos da organização da produção agrícola, a localização e participação dos fornecedores de insumos e serviços, os aspectos da estruturação das usinas, e as estruturas e níveis do potencial de atendimento de normativas internacionais quanto à sustentabilidade. Verificou-se a falta de mão de obra qualificada no setor, tanto na área agrícola quanto industrial, problema que pode ser agravado em virtude da obrigatoriedade da colheita ser 100% mecânica até 2017. Além disso, percebeu-se que as perspectivas quanto à produção e processamento da cana na região são grandes, e que esta estruturação, por parte das usinas e produtores, vem

crescendo com sustentabilidade (econômica, social e ambiental), apesar destas mudanças acontecerem lentamente.

Carvalho (2009), por sua vez, analisou o desenvolvimento do setor sucroalcooleiro em Minas Gerais e seu processo de reestruturação territorial no município de Iturama, Pontal do Triângulo Mineiro, com destaque ao tipo de colheita de cana-de-açúcar. Concluiu-se que o processo de expansão do setor sucroalcooleiro tem sido assegurado pelos novos capitais incentivados pelas políticas de aumento da produção de agrocombustível nos últimos anos, o que tem contribuído para o aumento da produtividade dos cortadores de cana.

3.2 A colheita da cana

Como as operações de manejo da colheita da cana-de-açúcar são caracterizadas como onerosas e penosas para execução completamente manual, no Brasil, a maior parte da colheita é realizada por meio do corte manual e carregamento mecânico. No entanto, os apelos ambientais e sociais vem impulsionando mudanças no sistema de colheita da cana, que se encontra atualmente em fase de substituição do corte manual pelo mecanizado.

Na mecanização do corte da cana, o trabalhador opera um equipamento, que pode ser uma máquina cortadora (corta os colmos de forma inteira) ou uma máquina colhedora (colhedora de cana inteira ou de cana picada), o qual realiza as operações de limpeza parcial da matéria-prima e de movimentação e descarregamento em um veículo, que pode ser um caminhão ou uma carreta tracionada por um trator (SANTOS et al., 2010; MUNDIM, 2009).

A capacidade efetiva de uma colhedora varia, em média, de 750 a 1.200 toneladas de cana-de-açúcar colhida por dia, dependendo do modelo utilizado (ANSEMI, 2006 apud SCHMIDT JUNIOR, 2011). Considerando que no trabalho braçal até 12 toneladas de cana podem ser cortadas em 10 horas de trabalho/dia, uma máquina colhedora pode substituir o corte manual de cerca de 100 homens em um dia de trabalho (BRAUNBECK et al., 2009).

Um dos fatores limitantes para o uso de colhedoras de cana-de-açúcar é a declividade do terreno, já que elas foram originalmente projetadas para operação em terrenos planos, como os encontrados em regiões canavieiras da Austrália e Flórida-EUA. Possuindo centro de gravidade elevado, essas máquinas podem operar até 12% de declividade, de modo a se evitar risco de acidentes por tombamento (RIPOLI &

PARANHOS, 1987 apud SANTOS et al., 2010), fator que pode inviabilizar a produção de cana em certas regiões do estado de Minas Gerais.

Dessa forma, paralelamente ao desenvolvimento de máquinas que viabilizem o corte e carregamento mecanizado da cana-de-açúcar, torna-se necessária a elaboração de mecanismos de gestão eficiente da cadeia produtiva da cana, de forma a integrar as operações da colheita ao transporte até às unidades processadoras.

4. O TRANSPORTE DE CARGA E O SISTEMA FERROVIÁRIO NO BRASIL

4.1 A logística do transporte de carga

O transporte é considerado como uma das atividades mais relevantes da logística, sendo responsável pela movimentação externa do produto (matéria-prima, componentes, produto semi-acabado, produto acabado, peças de reposição) da fonte produtora à fonte consumidora.

O sistema de transporte acaba, portanto, impactando significativamente nos custos e no desempenho de atividades logísticas, como nível de serviço ao cliente e gestão de estoques. Souza (2001) abordou em seu trabalho as teorias da logística e da competitividade empresarial, além do modelo da cadeia de produção agroindustrial, contribuindo para a reestruturação, redução de custos e aumento da competitividade em agroindústrias do setor sucroalcooleiro.

A escolha do modo de transporte, por sua vez, é influenciada pelos fatores custo, tempo de trânsito do ponto de origem ao destino, risco relacionado à integridade da carga, e frequência do transporte. O fator custo, normalmente, é o mais importante do ponto de vista econômico e financeiro, enquanto que os outros fatores estão relacionados ao atendimento do nível de serviço exigido pelo cliente (FARIA & COSTA, 2005). Os custos incorridos na oferta dos serviços de transporte podem ser

caracterizados como investimentos para implementação, de responsabilidade pública ou privada, e custos de transferência, como os custos operacionais (combustível, desgaste dos veículos, rota, riscos, carga de retorno, particularidades da carga, dimensão, volume, valor, pessoal etc.), administrativos, infra-estrutura, impostos e taxas.

Além da conveniência no transporte porta a porta, o transporte rodoviário corresponde a um modal com alta flexibilidade (opera em vários tipos de estradas, movimentando produtos de alto valor a curtas distâncias), frequência e disponibilidade dos serviços, aspectos que o caracterizam como dominante no transporte de cargas no Brasil.

No entanto, o excesso de peso dos caminhões aliado à regulamentação e fiscalização ineficientes contribuem para aumentar os custos operacionais do transporte rodoviário, em virtude do aumento do consumo de combustíveis, desgaste dos pneus, problemas mecânicos e acidentes mais frequentes. No caso do transporte de cana-de-açúcar, caminhões evitam as rodovias e estradas bem conservadas que cobram pedágio e que proíbem o transporte de certos tipos de veículos, como o treminhão. As rodovias vicinais, que se apresentam na maioria das situações inadequadas para suportar o peso dos caminhões, acabam sendo portanto utilizadas por estes veículos, ficando a manutenção das estradas sob a responsabilidade das próprias usinas.

No transporte ferroviário, os produtos transportados geralmente tem prazos de entrega mais folgados e baixa razão valor-densidade e valor-volume. O desempenho, em termos de tempo de entrega, é afetado pelo tempo envolvido nas operações de transição e composição do trem (corresponde a mais de 80% do tempo em trânsito), já que a partida somente acontece após um determinado número de vagões ser carregado, implicando em grandes tempos de espera. Além disso, as características de custos fixos altos e custos variáveis relativamente baixos do transporte ferroviário pode refletir em custos totais unitários reduzidos para movimentação que envolva grandes quantidades de cargas, desde que o objetivo seja a otimização do sistema.

O modal hidroviário é caracterizado por transportar cargas em volumes substanciais que apresentem baixa razão valor-peso e que não sejam perecíveis. As vias marítimas e fluviais oferecem capacidade de transportar cargas pesadas com reduzidas taxas de frete, porém, é um transporte lento, havendo frequentemente atrasos nos portos e terminais.

Nesse sentido, é de fundamental importância a análise da matriz de transporte de cargas no Brasil, a qual vem, nos últimos anos, responsabilizando o modal rodoviário por cerca de 61% do transporte, contra 20% do modal ferroviário e 13% do modal

hidroviário, diferentemente da matriz americana, onde se destaca a utilização de ferrovias, seguido das rodovias e hidrovias, as quais representam 38%, 26% e 16% do transporte de cargas, respectivamente (COPPEAD, 2005).

Em se tratando de cargas agrícolas, a Business Review Brasil (2013) informou que o modal rodoviário está sendo utilizado para movimentar, na safra de 2012/2013, cerca de 80% dos grãos brasileiros. Conforme estudo de viabilidade econômica dos transportes de cargas (TRANSPORTA BRASIL, 2010), o modal rodoviário, atualmente responsável por 58% da movimentação, é o mais adequado para as distâncias inferiores a 300 km. Para distâncias entre 300 e 500 quilômetros, o desejável é a utilização do meio ferroviário (25% do movimento) e, para mais de 500 quilômetros, recomenda-se o fluvial (17%). No Brasil, no entanto, a média de percurso do transporte rodoviário de grãos acontece em trechos superiores a 1.000 quilômetros.

Para o início do século XXI, as previsões de Caixeta-Filho (2004) dizem respeito à utilização predominante do modal ferroviário, representando o transporte de 56% para grãos agrícolas, à redução para 35% de carga transportada pelo modal rodoviário, e ao aumento do uso do transporte fluvial para índices superiores a 8%, padrões observados em países considerados desenvolvidos. Esta expectativa na reorientação na matriz de transporte de carga no Brasil vem sendo explicada pela finalização bem-sucedida do processo de concessão da Rede Ferroviária Federal (RFFSA), pela privatização de uma série de rodovias e pelos investimentos público e privado na reestruturação da malha ferroviária e no incremento da navegabilidade de sistemas fluviais de diversas regiões do país.

Vale ressaltar que, para a ligação entre um par de origem e destino, as modalidades ferroviária e hidroviária normalmente apresentam-se conjugadas com a modalidade rodoviária, caracterizando as alternativas intermodais ou multimodais, em detrimento da unimodalidade.

Quando se utiliza mais de um modal no transporte de mercadorias, as vantagens de cada modal podem ser combinadas, podendo ser caracterizadas tanto pelo serviço, quanto pelo custo. O transporte rodoferroviário, por exemplo, une o custo baixo do modal ferroviário para longas distâncias à acessibilidade do modal rodoviário, proporcionando um melhor equilíbrio na relação preço/serviço.

Produtos de baixo valor agregado, como commodities (minério de ferro, grãos, cimento), são predominantemente transportados por mais de um modal, enquanto que para produtos de alto valor agregado, o deslocamento por mais de um modal é bastante inexpressivo no Brasil. Nos EUA, o transporte rodoferroviário apresentou crescimento

acumulado de 50% nos últimos 10 anos, sendo investido, desde a década de 80, mais de US\$ 500 bilhões na malha ferroviária (AAR, 2011).

Atualmente, o sistema de transporte brasileiro passa por um momento de transição no que diz respeito às possibilidades de utilização de mais de um modal na movimentação de cargas por toda a cadeia de suprimentos. O processo de privatização de ferrovias e portos e a execução de obras infra-estruturais, além da iniciativa de vários embarcadores e prestadores de serviço logístico, são fatores que vem contribuindo para as mudanças na rede logística.

Gonçalves (2008) identificou as rotas de transportes mais econômicas para o escoamento da soja e minérios de ferro e manganês oriundos do estado do Mato Grosso do Sul com destino à exportação. Para tal, foram levantados os pólos de geração destas cargas, assim como os modais de transportes existentes e futuros, terminais de transbordos e portos marítimos para exportação (Porto de Santos e Porto de Paranaguá, no Brasil, e Porto de Nova Palmira, no Uruguai). Os métodos utilizados foram a geração de cenários, os modelos de custo de transporte para os modos rodoviário, ferroviário e fluvial, e o sistema de informação geográfica. Os resultados obtidos indicaram que opções de rotas com uso do modal hidroviário são as que possuem menores custos, com forte participação da hidrovía Paraguai-Paraná.

No trabalho de Branco et al. (2010), foram pesquisados os desafios para o desenvolvimento da multimodalidade no transporte das safras agrícolas pelo corredor Centro-Oeste sob a ótica dos agentes envolvidos, em especial os transportadores (prestadores de serviço de transporte) e os embarcadores (contratantes do serviço de transporte). Os resultados contribuíram para ratificar ou retificar a opinião pública sobre os desafios à multimodalidade na região, sendo ainda documentadas algumas percepções, insatisfações, estratégias e perspectivas levantadas nas entrevistas aplicadas.

Apesar da existência de diversos estudos sobre a utilização do transporte intermodal, no Brasil, todas as alternativas modais e possíveis combinações ainda não são utilizadas de forma eficiente, em virtude, principalmente, do baixo nível de investimentos verificado nos últimos anos com relação à conservação, ampliação e integração dos sistemas de transporte.

Contudo, as iniciativas do governo federal, como o Programa de Investimentos em Logística, lançado em agosto de 2012 (MT, 2012a), prevê aplicação de R\$ 133 bilhões para a modernização e ampliação das malhas rodoviária (R\$ 42 bilhões) e ferroviária (R\$ 91 bilhões), num horizonte de tempo de 30 anos. No modal ferroviário,

espera-se a construção de 10 mil quilômetros de novas ferrovias, num modelo de parceria público-privada onde o governo federal fica responsável pela contratação da construção, manutenção e operação da ferrovia, enquanto a empresa pública Valec – Engenharia, Construções e Ferrovias S.A., vinculada ao Ministério dos Transportes, compra a capacidade integral de transporte e faz a oferta pública dessa capacidade aos usuários que queiram transportar carga própria, aos operadores ferroviários independentes e às concessionárias de transporte ferroviário. Quebra-se, dessa forma, o monopólio na oferta de serviços e assegurando o direito de passagem dos trens em todas as malhas, na busca da modicidade tarifária.

4.2 O transporte da cana

No Brasil, com a implantação da indústria automobilística na década de 50, adotou-se uma política de grandes investimentos na construção de rodovias e de descaso da malha ferroviária e hidrovieira do país, e que comprovadamente são modais mais econômicos para o transporte de cana. Em decorrência da falta de desenvolvimento, manutenção e ampliação das ferrovias, houve desativação de linhas já existentes nas usinas de açúcar.

Uma pesquisa da Escola Superior da Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq-USP), sobre o manejo e transporte da cana no Brasil e na Austrália, revelou que, enquanto no Brasil não existe o uso de transporte ferroviário da cana-de-açúcar e os caminhões, contratados pelas usinas e pagos pelos fornecedores, são utilizados em distâncias médias de 25 km, na Austrália, a usina é geralmente responsável por todos os gastos de transporte da matéria-prima do campo à indústria. No estado de Queensland, por exemplo, os caminhões usados são comparativamente menores e mais ágeis, já que atuam como apoio ao transporte ferroviário, principal modalidade adotada para o deslocamento da cana às usinas de açúcar (USP, 2011). São cerca de 3.000 km de trilhos na linha principal, 250 locomotivas e 52 mil caixotes (e não vagões) contendo quatro rodas e eixo, os quais se encarregam de transportar até 36 milhões de toneladas de cana no período da safra (MUNDO DA CANA, 2011). Além disso, a velocidade dos trens gira em torno de 40 km/h, numa distância máxima de 119 km a ser percorrida até a usina.

Da mesma forma, nos Estados Unidos, especificamente na Flórida, a ferrovia South Central Florida Express (SCFE), com extensão aproximada de 250 quilômetros de trilhos, tem como principal carga a cana-de-açúcar, além de outros produtos

utilizados no seu cultivo, como fertilizantes, e no seu processamento, sendo adquirida em 1994 pela empresa United States Sugar Corporation, também proprietária de canaviais e usina de açúcar (AKRON, 2012). Ressalta-se que a United States Sugar Corporation é a única no país que transporta toda a sua cana até a respectiva unidade de beneficiamento pelo modal ferroviário, utilizando-se de 14 locomotivas e 950 vagões, com capacidade de 40 toneladas de cana cada. De 1994 a 2003, o tráfego ferroviário sofreu aumento de 78%, passando de 41 mil a 73 mil composições (locomotivas-vagões), sendo que em 2010, um total de 117 mil composições foram transportadas (USSUGAR, 2013a; 2013b).

No transporte ferroviário, após o corte, a cana é carregada em caminhões ou em carretas puxadas por tratores, sendo posteriormente deslocada até a proximidade da linha férrea, onde acontecerá o transbordo aos vagões (HIGGINS & DAVIES, 2005), conforme pode ser visualizado na Figura 4. Como o transporte da cana recém colhida deve acontecer, preferencialmente, dentro de 12 a 18 horas e, definitivamente, no prazo de 24 horas, a alimentação das ferrovias deve apresentar fluxo constante, 24 horas por dia e 7 dias por semana, durante a temporada de esmagamento (MUNDO DA CANA, 2011), caracterizando o sistema de produção do tipo just-in-time. Além de Queensland e Flórida, ferrovias importantes para o transporte da cana-de-açúcar ainda operam em Cuba, Fiji, Java e Filipinas.



Figura 4 – Imagens demonstrativas do carregamento de cana-de-açúcar em vagões ferroviários.

Fonte: AKRON (2012)

Com relação ao transporte hidroviário no Brasil, a Usina Diamante (hoje pertencente ao grupo COSAN), localizada na Bacia do Médio Tietê (SP), implantou, na década de 80, um sistema de transporte fluvial para a cana, em conjunto com o transporte rodoviário, que contou com a instalação de quatro pontos de transbordo por meio de guindastes do tipo monta-carga, onde há a transferência da matéria-prima às chatas fluviais. Os indicadores apresentaram os seguintes números: deslocamento de 200 a 500 toneladas de cana por viagem; uso de no máximo 10 km de rodovia, contra 100 km no sistema antigo; e redução de custos da ordem de 53,1% (SANTOS et al., 2010).

Atualmente, estima-se que mais de 95% do escoamento da cana-de-açúcar dos canaviais às unidades processadoras, no Brasil, seja feito pelo modal rodoviário, que compreende as vias de acesso da própria fonte produtora, denominadas carreadores e estradas vicinais, e as vias municipais, estaduais e federais (SANTOS et al., 2010).

Nos canaviais, as vias são normalmente compostas por estradas de largura média de 5 a 7 metros, quando dentro das propriedades (carreadores), e de largura de 7 a 10 metros, representando a ligação entre a propriedade canvieira e as demais vias de acesso à unidade industrial (estradas vicinais). No caso dos carreadores, além de ser o segmento primário da malha rodoviária de uma propriedade, apresentam ainda as





funções de separar e delimitar os talhões da cultura e de servir de espaço para manobras do maquinário agrícola destinado à colheita da cana.

Quando a distância entre a área de produção e a unidade industrial for inferior a 5 km, torna-se viável a adoção de tratores agrícolas tracionando uma, duas ou três carretas, desde que o percurso não apresente declives ou aclives acentuados, o que dificultaria o manejo e aumentaria os riscos de acidentes. Neste caso, a capacidade líquida de carga transportada equivale a cerca de 10 toneladas, quando se traciona apenas uma carreta, e de 4 a 6 toneladas por carreta, nas demais opções.

Em situações de distâncias superiores, a predominância dos caminhões no transporte é incontestável, existindo no mercado opções que variam desde caminhões médios, com 8 a 10 toneladas de carga líquida, até os superpesados, com 45 a 50 toneladas de capacidade. Para grandes distâncias, recomenda-se a escolha das maiores capacidades de transporte, em função da economia de escala alcançada.

De acordo com Mundim (2009), dentre os vários tipos de composições de transporte de cana inteira ou cana picada, os mais usuais são o caminhão com um reboque, o caminhão com dois reboques e o cavalo-mecânico com dois semi-reboques, chamados de Romeu e Julieta, Treminhão e Rodotrem, respectivamente (Quadro 1).

Quadro 1 – Tipos de composições de transporte de cana

Descrição	Esquema	Nome popular
Caminhão plataforma		“Truck”
Caminhão plataforma com um reboque acoplado		“Romeu e Julieta”
Caminhão plataforma com dois reboques acoplados		“Treminhão”
Cavalo mecânico com dois semi-reboques acoplados		“Rodotrem”

Fonte: SILVA (2006)

Ressalta-se que o uso do caminhão ou do cavalo-mecânico pode ser otimizado pela exclusão ou adoção de carretas reservas, dependendo da melhor configuração da frota a ser utilizada no campo e na usina. Atualmente, há o predomínio de carrocerias fechadas nas partes frontal e traseira e com fueiros largos e metálicos nas laterais, estendendo-se às carretas, reboques e semi-reboques, com altura da carga limitada aos níveis compatíveis, para reduzir as perdas de colmos durante o percurso até a usina.

Para Santos et al. (2010), o veículo mais utilizado para o transporte de cana é o Romeu e Julieta, com capacidade de carga líquida em torno de 25 a 30 toneladas, cujas carrocerias podem ser tanto de fueiros (cana inteira) como fechadas (cana picada). Essa opção é recomendada para distâncias de 20 a 50 km, desde que as estradas tenham boa conservação, já que as velocidades médias de descolamento devem ser superiores a 50 km/h para que o uso desses veículos seja economicamente viável.

No trabalho de Iannoni & Morabito (2006), foi analisado o desempenho do sistema de recepção de cana (da balança até as moendas) da Usina São Martinho, localizada na região de Ribeirão Preto-SP, mediante utilização de técnicas de simulação discreta através da implementação de modelo computacional no software Arena. As principais medidas de desempenho avaliadas foram relacionadas à taxa de utilização das moendas, à quantidade média de cana descarregada, de acordo com a capacidade de moagem da usina, e ao tempo médio de espera dos caminhões no sistema de recepção. Foram adotados no modelo quatro tipos de caminhões para o transporte da cana: rodotrem (cana picada), treminhão (cana picada), romeu e julieta (cana inteira e picada) e toco (cana inteira), os quais transportam, em média, o equivalente a 65, 45, 25 e 15 toneladas de cana, respectivamente. A análise mostrou que a utilização de treminhões, com o posterior desengate dos dois reboques acoplados no estoque do pátio, apresentou o melhor desempenho do ponto de vista da quantidade média de cana em espera no pátio da usina e da quantidade média de cana descarregada por dia nas moendas.

Mundim (2009) também abordou o problema de dimensionamento da frota de equipamentos utilizados no corte, carregamento e transporte da cana a partir do uso de simulação de eventos discretos. Investigou-se a necessidade de equipamentos frente a diferentes políticas de despacho da frota de caminhões, comparando o despacho estático de conjuntos de caminhões por frente de corte versus o despacho dinâmico, e a adoção de caminhões do tipo cavalo mecânico (que não possuem carroceria própria) para as composições de transporte. O cenário com despacho dinâmico e sem adoção de caminhões do tipo cavalo mecânico apresentou o melhor resultado de custo operacional. Os resultados indicaram também que a adoção de reboques reserva na lavoura é economicamente viável.

Um outro tipo de unidade que vem sendo recentemente adotada para o transporte de cana picada é o sistema de containers, que utiliza caçambas ou caixas metálicas, móveis e transportáveis separadamente, com capacidade de 5 a 7 toneladas, como substituição às carretas convencionais fixas ao chassi de unidades transportadoras (SANTOS et al., 2010). Dentro dos talhões, o container normalmente é conduzido em

carreta tracionada por um trator que acompanha a unidade carregadora, sendo transferido por meio de empilhadeiras para o veículo a ser utilizado no deslocamento até a usina.

Apesar do manuseio dos containers implicar no uso de equipamentos próprios e de transbordo no campo, tal sistema apresenta a vantagem de agilizar o carregamento dentro do talhão e reduzir os problemas de compactação causados pelo trânsito de unidades transportadoras muito pesadas. Na usina, a recepção também se torna independente da moagem, já que a cana picada pode ser temporariamente armazenada nos próprios containers, desde que seja durante um curto período de tempo em decorrência de deterioração e perdas de sacarose. Dá-se o nome de “pátio sobre rodas” à estocagem da cana nas próprias composições que realizam o transporte desde a lavoura.

Na recepção da cana-de-açúcar na usina, os veículos carregados são pesados na chegada e após o descarregamento, para a obtenção do peso da matéria-prima. Após passar pela balança, os veículos carregados vão para os pontos de descarga da usina, dependendo do tipo de caminhão, da cana (inteira ou picada), do tamanho das filas e da quantidade de cana a ser descarregada. A cana pode ser descarregada diretamente na mesa alimentadora ou em pátio próprio para estocagem, permanecendo, neste caso, dentro ou fora das unidades em que se encontravam. Antes do descarregamento, amostras são retiradas, por sonda, para determinação do teor de sacarose.

De acordo com Santos et al. (2010), os veículos normalmente possuem um sistema de abertura lateral ou traseira da carroceria na razão direta de seu levantamento, ocorrendo o basculamento por meio de cabos e pontes rolantes, ou mesmo através de um sistema de êmbolos hidráulicos fixados ao solo e que empurram lateralmente a carroceria basculante (Figura 5).



Figura 5 – Descarregamento da cana por báscula lateral.
Fonte: SILVA (2006) apud MUNDIM (2009)

Para o perfeito funcionamento das usinas, que significa sincronia entre as frentes de corte, transporte e descarregamento da cana nas moendas, é fundamental que haja um eficiente planejamento, controle e programação destas atividades.

4.3 O sistema ferroviário

4.3.1 A rede ferroviária brasileira

As companhias ferroviárias brasileiras começaram a surgir em 1922, atingindo atualmente 29 mil quilômetros de extensão, os quais são percorridos por cerca de 2 mil locomotivas a vapor e 30 mil carros e vagões. As locomotivas elétricas e a diesel entraram em operação a partir de 1930 e 1939, respectivamente.

Em 1957, com o intuito de unificar administrativamente as estradas de ferro pertencentes à União, foi constituída a Rede Ferroviária Federal S. A. (RFFSA), a qual foi incluída no Plano Nacional de Desestatização (PND), sendo iniciada, em 1996, a transferência das malhas para a iniciativa privada por um período de 30 anos, prorrogável por mais 30 anos, caracterizando contratos individuais de concessão e de arrendamento de longo prazo (MT, 2008). Esta política de concessões adotada pelo Governo Federal permitiu a importação de equipamentos para a reforma e reativação das ferrovias. Quase todos os equipamentos, hoje em dia, são importados pelas concessionárias, com exceção dos vagões, cuja produção nacional vem sendo aquecida em virtude dos investimentos privados e do aumento das cargas transportadas pelas concessionárias.

Entre 1997 e 2003, a estimativa é que as concessionárias tenham investido na malha ferroviária nacional em torno de R\$ 4 bilhões, os quais contribuiram para recuperar parte da frota sucateada herdada da RFFSA, enquanto que o investimento pela União não ultrapassou os R\$ 500 milhões (OLIVEIRA & CAIXETA-FILHO, 2007).

A entrada de capital não só expandiu a participação das ferrovias na matriz de transportes como possibilitou um aumento na produção ferroviária nacional de 137 bilhões de TKU (Tonelada Quilômetro Útil) no ano de 1997 para 221,9 bilhões em 2005, representando um crescimento de 62% (LANG, 2007).

Segundo dados da FCA (2013), EFVM (2013) e MRS (2013), a variedade de produtos que utilizam as linhas férreas como meio de transporte é grande, abrangendo produtos agrícolas (milho, soja, farelo, algodão, café), industrializados (açúcar, álcool,

insumos, fertilizantes, ferro-gusa, produtos siderúrgicos, produtos petroquímicos, autopeças, papel, celulose) e outros tipos (bauxita, calcário, fosfato, granito, carvão).

O transporte de contêineres por ferrovia também vem se expandindo, fortalecendo o transporte intermodal de cargas. Por se consistir numa caixa com tamanho e formato convenientes, o uso de contêiner, além de melhor proteger o produto, permite maior velocidade na movimentação das cargas, já que não há manipulação do produto durante o carregamento e descarregamento, e, conseqüentemente, redução dos custos de transporte (TAKITA E REIS, 2000 apud LANG, 2007). Outro processo de integração que melhora as operações intermodais, e já adotado por algumas concessionárias, como a ALL, MRS, EFC e FCA, é a utilização de veículos denominados de rodotrilhos, que são carretas que trafegam tanto no asfalto quanto nos trilhos, não sendo necessária a baldeação.

Um movimento importante que vem ocorrendo no setor são as parcerias entre clientes e concessionárias, estabelecidas a partir de contratos de longo prazo. Neste sistema, o cliente, cuja mercadoria tem transporte garantido, financia a compra ou reforma de vagões e/ou de locomotivas através de adiantamento de fretes, ou adquire o ativo e o aluga à ferrovia (BRITO, 2005).

O investimento de clientes na ferrovia é uma tendência forte entre as companhias para as quais o gasto com transporte tem peso significativo no valor do produto. No setor sucroalcooleiro, empresas como Cosan, Cargill, Crystalsev, Copersucar, Sucden, Grupo Coruripe e EDF&Man também estabeleceram contratos de longo prazo com as concessionárias ferroviárias.

Em 2004, a EDF&Man, responsável por cerca de 15% das exportações brasileiras de açúcar, fechou um contrato com a Brasil Ferrovias para o transporte anual de 320 mil toneladas. A empresa investiu R\$ 10 milhões num projeto de terminal de transbordo e comprou 4 locomotivas e 88 vagões (NECESSIDADE, 2005 e BRITO, 2004 apud OLIVEIRA, 2005).

Já a Sucden do Brasil investiu um total de US\$ 4 milhões na construção de um terminal rodoferroviário denominado Araçatuba Logística para o escoamento, por ferrovia, do açúcar produzido na região até o porto de Santos, e cerca de R\$ 2,5 milhões na aquisição de locomotivas e vagões (ARALCO, 2005 apud OLIVEIRA, 2005). Aralco (2005) afirma ainda que a utilização do transporte ferroviário em substituição ao rodoviário para o transporte de açúcar garantiu às usinas uma redução de 20% no custo do frete.

No caso da Copersucar, a aplicação de investimentos para reduzir custos e agilizar o escoamento da produção de açúcar do interior de São Paulo é da ordem de R\$ 2 bilhões até 2015, os quais estão sendo destinados à aquisição de material rodante (trens e vagões) e implantação de desvios (denominado “Pera Ferroviária”¹) e de terminais multimodais, incluindo a armazenagem, recepção e expedição (TERRA, 2013b). Quanto à recuperação da malha ferroviária pertencente à União, a responsabilidade é da concessionária do trecho, Ferrovia Centro-Atlântica.

No fim de 2012, a Rumo Logística, empresa do grupo Cosan, investiu R\$ 100 milhões na implementação de um terminal intermodal, próximo a linhas férreas, para escoamento de açúcar e grãos da cidade de Itirapina, região de Rio Claro-SP (INVESTESP, 2012). Segundo Terra (2013b), até a safra de 2014 da cana-de-açúcar, serão empreendidos R\$ 1,3 bilhão na reativação de trechos ferroviários inoperantes e em duplicação, principalmente no trecho que liga Itirapina a Santos (R\$ 590 milhões), na aquisição de vagões e locomotivas, permitindo o transporte de mais de 11 milhões de toneladas de açúcar por ano (R\$ 402 milhões), e em obras de infraestrutura na construção e ampliação de terminais em Santos e no interior (R\$ 336 milhões). Além do escoamento de açúcar pelo modal ferroviário, a Rumo espera, juntamente com outros parceiros, transportar também suco de laranja e farelo de soja até o porto de Santos.

Com todos estes investimentos por parte dos clientes, as ferrovias brasileiras estão seguindo uma tendência já observada nos Estados Unidos, onde as operadoras ferroviárias têm apenas um terço dos ativos, sendo o restante financiado pelos usuários (BRITO, 2005).

Técnicas para avaliação econômica de projetos foram questionadas por Lang (2007), que apontou quais os benefícios de um projeto para a economia e para a sociedade como um todo, de forma a auxiliar a iniciativa pública e privada a selecionar projetos, alocar recursos escassos em projetos de infra-estrutura de transportes de maneira efetiva e definir políticas públicas para o transporte ferroviário. Concluiu-se que o método de Análise Custo-Efetividade (ACE) se mostrou uma excelente ferramenta para avaliar projetos que apresentem benefícios sociais, permitindo a priorização de acordo com o objetivo do avaliador.

Para Camargo & Cunha (2012), o transporte ferroviário é um dos modais mais eficientes para escoamento da safra brasileira de grãos agrícolas. Apesar disso, observa-se que a malha ferroviária nacional, bem como a sua frota de veículos, não tem

¹ Pera Ferroviária: Funciona como um retorno, em que o trem entra de frente no trecho e, depois de percorrê-lo, segue viagem no sentido contrário. Com isso, são desnecessárias as manobras de locomotivas e vagões, dando rapidez à movimentação das composições.

sido expandida no mesmo ritmo que a produção de grãos, impondo restrições de capacidade de escoamento deste modal.

Com o intuito de contribuir para o aumento de produtividade nas ferrovias, Camargo & Cunha (2012) realizaram uma análise de possíveis estratégias operacionais para um sistema de transporte ferroviário composto de duas ferrovias distintas e considerando múltiplas origens, múltiplos produtos e destino a um único porto, operando em ciclo fechado, a partir de uma abordagem mista simulação-otimização. A primeira etapa do trabalho consistiu na construção de um modelo de simulação estocástica convencional, e a segunda, na enumeração de todas as decisões que poderiam ser substituídas por regras de decisão heurísticas com o objetivo de maximizar o resultado do modelo, quais sejam: definição de destino de vagões vazios, escolha de produto para ser carregado em vagões vazios que chegam às estações carregamento, escolha de veículo em fila para descarregar (caminhão e vagão), seleção de vagões carregados para formação de trens (nas estações de carregamento e na estação intermediária) e escolha de navio (dentre aquelas em fila) para atracação e carregamento.

Atualmente, o sistema ferroviário brasileiro tem 29.487 km de extensão, distribuído pelas regiões Sul, Sudeste, Nordeste e parte do Centro-Oeste e Norte do país. Foram concedidas 12 malhas com 28.314 km, equivalente a 95% do sistema, sendo uma concessionária pública, a Valec, que detém a concessão da Ferrovia Norte-Sul. As outras 11 malhas concedidas à iniciativa privada para o transporte de cargas, que totalizam 27.894 km, são operadas e administradas pelas seguintes concessionárias: ALL - América Latina Logística do Brasil S.A.; Ferrovias Bandeirantes S.A.; FERRONORTE S.A. - Ferrovias Norte Brasil; Ferrovia Novoeste S.A.; Ferrovia Centro Atlântica S.A.; Estrada de Ferro Carajás; Estrada de Ferro Vitória a Minas; Companhia Ferroviária do Nordeste; Ferrovia Tereza Cristina S.A.; Ferrovia Paraná S.A.; e MRS Logística S.A. (MT, 2008).

O estado de Minas Gerais, com uma área de 588.383,6 km², conta com 853 municípios distribuídos em 12 mesorregiões (IBGE, 2013a): Norte, Noroeste, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Central Mineira, Jequitinhonha, Vale do Mucuri, Metropolitana, Oeste, Campo das Vertentes, Zona da Mata, Sul/Sudoeste e Vale do Rio Doce. Quanto à malha ferroviária mineira, atualmente a operação fica a cargo das concessionárias MRS Logística, Estrada de Ferro Vitória Minas e Ferrovia Centro Atlântica.

A MRS Logística (MRS), com sede em Juiz de Fora-MG, é a concessionária que explora cerca de 1.674 quilômetros de estradas de ferro que interligam os Estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo (MRS, 2013). Com 905 quilômetros de extensão, a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), com sede em Vitória-ES e atualmente administrada pela Vale (antiga Companhia Vale do Rio Doce), compreende a cidade de Belo Horizonte (passando pela região de mineração de Itabira) à Cariacica, na Região Metropolitana de Vitória, e aos portos de Tubarão, Praia Mole, e Barra do Riacho, no Espírito Santo.

A Ferrovia Centro Atlântica (FCA), por sua vez, atua nos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Goiás, Bahia, Espírito Santo, Distrito Federal, Sergipe e Minas Gerais, totalizando 7.897 km de malha ferroviária – a maior do país (Figura 6). Além disso, há pontos de intercâmbio com as ferrovias MRS Logística, Transnordestina Logística, América Latina Logística Malha Paulista (ALLMP) e Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) e acessibilidade aos portos de Vitória, Santos e Angra dos Reis e aos terminais de carga de Salvador e Uberlândia. A frota atual é composta por mais de 10.000 vagões e cerca de 480 locomotivas, todas monitoradas via satélite (TRANSPORTE, 2013).

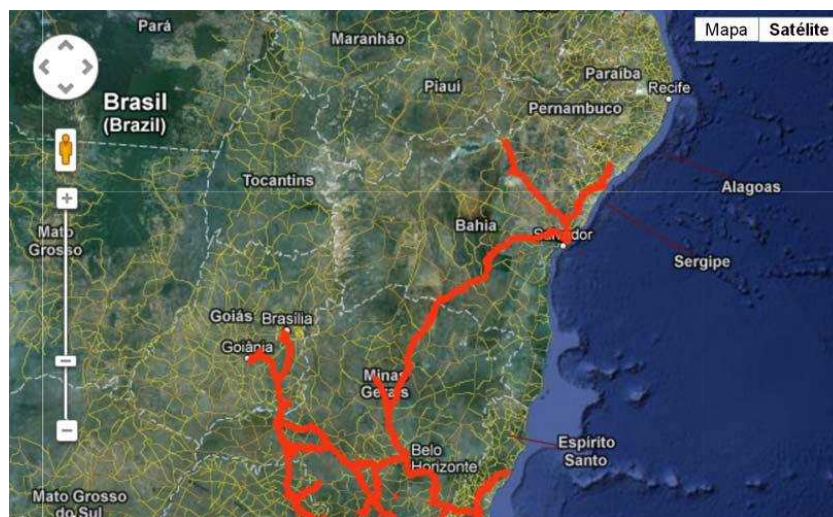


Figura 6 – Mapa da Ferrovia Centro Atlântica.
Fonte: FCA (2013)

É importante registrar que o acesso da FCA aos grandes portos brasileiros se dá por meio do direito de passagem, ou seja, utilizando trechos que são explorados por outras empresas do setor ferroviário, havendo destaque para a rota de Goiás a Mato Grosso e Espírito Santo, e a conexão com EFVM.

4.3.2 A presença da ferrovia FCA no Triângulo Mineiro

De acordo com a divisão federal das ferrovias para privatização, a região de Uberaba foi concedida à Ferrovia Centro Atlântica, que implementou a oficina de revisão programada e de inspeção de locomotivas e vagões por ter localização considerada estratégica, responsabilizando-se pelo escoamento de mercadoria entre as cidades de Ribeirão Preto (SP), Araxá (MG), Uberlândia (MG) e Araguari (MG). Bessa (2007) apud Silva (2008) afirma que:

[...] Desse momento em diante, ocorreu uma série de mudanças na estrutura ferroviária, primordialmente em decorrência das fusões e aquisições. As malhas ferroviárias no Triângulo Mineiro, nesse contexto passaram a ser operadas unicamente pela FCA, cuja controladora é a Companhia Vale do Rio Doce.

Diariamente trafegam na FCA mais de 300 vagões contendo soja e farelo com destino ao Porto de Tubarão, em Vitória (ES), e fertilizante no caminho de volta, circuito que ficou conhecido como “Rota do Grão”. Os grãos transportados tem origem em Brasília (DF), Anápolis (GO), Araguari (MG), Uberlândia (MG), Santa Luzia (MG) e Patrocínio (MG), enquanto os fertilizantes retornam para Uberaba (MG), Araguari (MG) e Catalão (GO).

Atualmente, encontra-se em operação um novo corredor de exportação entre o terminal de Pirapora (MG) e o terminal de produtos diversos no Complexo Portuário de Tubarão (ES), incluindo a implementação de um novo terminal de transbordo e armazenagem em Pirapora (AGROMUNDO, 2013). Dessa forma, o trecho ferroviário entre Pirapora e Corinto interligam a região restante da malha ferroviária da FCA e a EFVM, permitindo o escoamento da produção de soja, milho e outros grãos, até o porto de Tubarão, e de fertilizante e outros insumos ao noroeste de Minas.

A presença da FCA nas cidades de Uberaba, Uberlândia e Araguari, no Triângulo Mineiro, tem contribuído para um maior dinamismo no escoamento de diversos produtos, desde os fertilizantes fosfatados até carne, em vagão-frigorífico (fase experimental), partindo da cidade de Uberaba.

No Triângulo Mineiro, existem duas Estações Aduaneiras de Interior (EADI's) em funcionamento nas cidades de Uberaba e Uberlândia, atualmente denominadas Porto Seco do Triângulo e Porto Seco do Cerrado, respectivamente. Conforme Bessa (2007), a EADI é uma alfândega que oferece serviços de desembarço aduaneiro, entrepostagem, movimentação de contêineres e mercadorias em geral, destinadas à importação e

exportação, proporcionando uma redução de cerca de 30% nos custos, quando comparadas às operações realizadas nas alfândegas do litoral.

É importante ressaltar que não há embarque de cargas na estação de Uberaba, em virtude da pequena demanda existente até o presente momento. Portanto, a estação é apenas ponto de passagem para que o trem alcance outras localidades na região do Triângulo. Já em Uberlândia, a conexão dos modais rodoviário e ferroviário favorece a intermodalidade ou a multimodalidade, fator de atração de investimentos, uma vez que o sistema de transportes bem estruturado facilita o escoamento da produção e reduz os custos associados. Dessa maneira, a região do Triângulo Mineiro vem sendo caracterizada como uma região de potencialidades, concorrendo, com outras do país, na busca por novos empreendimentos.

5. ORIGEM E FERRAMENTAS DE PESQUISA OPERACIONAL

A origem da Pesquisa Operacional se deu na década de 30, quando se iniciou, na Inglaterra, estudos sobre a eficiência de técnicas de operações advindas de experimentos com interceptação de radar.

De forma mais conhecida, no entanto, o começo da utilização da pesquisa operacional tem sido geralmente atribuído a algumas iniciativas militares britânicas e americanas na Segunda Guerra Mundial, como manutenção e inspeção de aviões, escolha do tipo de avião para uma missão e dimensionamento de comboios de frota.

Os cientistas da época não fizeram mais do que aplicar o método científico, que já conheciam, aos problemas que lhes foram sendo colocados. Apoiados em dados e fatos, a idéia de criar modelos matemáticos passou a ser desenvolvida, possibilitando identificar os problemas em estudo e a simular e avaliar o resultado hipotético de estratégias ou decisões alternativas (GAVIRA, 2003).

Após o final do conflito, a abordagem de pesquisa operacional se voltou também para aplicação em problemas oriundos dos setores público e privado, em virtude da crescente complexidade das organizações. Os problemas de gerenciamento de atividades produtivas voltadas à programação da produção, controle de estoque, problemas de transporte, investimentos, dentre outras atividades, começaram então a ser estudados pelos mesmos cientistas.

Ao longo dos anos, a teoria e a utilização da pesquisa operacional se diversificaram, contribuindo para a expansão da área de conhecimento, cujas aplicações

abrangem indústria, comércio, serviços e setores governamentais. Especificamente, as áreas de expressiva importância estratégica que mais utilizam a pesquisa operacional são aquelas ligadas à energia, gestão industrial, gestão da qualidade, administração de operações, logística, finanças, marketing, planejamento e gestão de serviços, informação, dentre outras.

Apesar dos resultados obtidos pela pesquisa operacional durante a Segunda Guerra Mundial terem sido muito importantes para o sucesso das operações no conflito, eles foram limitados pela complexidade dos cálculos envolvidos. Somente após a disponibilização de métodos computacionais (hardware e software), o potencial desta técnica foi melhor aproveitado.

Com relação à definição mais apropriada para o termo Pesquisa Operacional, não existe um consenso entre os autores.

Ehrlich (1985) define a pesquisa operacional como um conjunto de técnicas quantitativas para auxiliar no processo de tomada de decisão dentro de uma filosofia de modelagem voltada, principalmente, à otimização de sistemas. Para Arenales et al. (2007), como processo de tomada de decisão estaria a ação de projetar, planejar e operar sistemas em situações que requerem alocações eficientes de recursos escassos.

De acordo com Gavira (2003), apesar de diferenças quanto à generalização ou particularização das definições, observa-se as mesmas características em todas elas, as quais seriam: i) abordagem do método científico do ponto de vista organizacional; ii) identificação do melhor curso de ações possível, visando a obtenção da melhor solução ou a solução ótima para o problema; e iii) utilização de equipes formadas por pessoas com diferentes experiências e habilidades.

5.1 Técnicas de pesquisa operacional

Um estudo de pesquisa operacional começa com a construção de um modelo conceitual simplificado do sistema a ser analisado, sendo a partir de então avaliado como se o sistema fosse real. Por causa da necessidade de incorporação de dados numéricos e outros eventos objetivos, os modelos de pesquisa operacional são quase sempre matemáticos e, portanto, requerem uma análise que emprega os métodos matemáticos (GAVIRA, 2003).

Para a formulação de um modelo matemático, simplificações razoáveis do sistema ou do problema real precisam ser consideradas. Dessa forma, o modelo deve ser o mais detalhado possível, de modo a captar os elementos essenciais do problema, mas

suficientemente tratável por métodos de resolução. Ressalta-se ainda que a validação do modelo, etapa fundamental para as experimentações, depende da solução do modelo matemático apresentar coerência com o contexto original.

Segundo Arenales et al. (2007), a formulação (modelagem) define as variáveis e as relações matemáticas que descrevem o comportamento relevante do sistema ou do problema real; a dedução (análise) aplica técnicas e tecnologia para resolver o modelo matemático e visualizar quais conclusões são sugeridas; enquanto que a interpretação (inferência) argumenta que as conclusões retiradas do modelo tem significado suficiente para que sejam tomadas decisões para o problema real. Frequentemente, no entanto, uma avaliação (julgamento) dessas conclusões ou decisões inferidas mostra que as mesmas não são adequadas, sendo imprescindível a revisão da definição do problema e/ou da sua modelagem matemática, repetindo-se o ciclo.

Ecker & Kupferschmid (1988) afirmam que a necessidade de se fazer escolhas ótimas em situações de incerteza determina duas categorias principais de modelos matemáticos usados na pesquisa operacional:

- Otimização (programação linear, programação inteira, programação não-linear, teoria dos grafos, entre outros); e
- Probabilidade aplicada (teoria das filas, modelos de estoques, simulação de eventos discretos, teoria dos jogos, entre outros).

Os métodos de otimização, também conhecidos como métodos de programação matemática, buscam pela melhor solução de um problema que possua várias (ou infinitas) soluções possíveis. Nos casos em que se pretende capturar a natureza aleatória e dinâmica de algumas classes de problemas reais, o recomendado é a abordagem dos tópicos de probabilidade aplicada, que são usados na predição de resultados de uma seqüência de eventos incertos.

Já os métodos heurísticos são citados nos trabalhos de Taha (2008) e Ballou (2006) como uma terceira categoria de modelagem matemática. Estes métodos são uma consequência de avaliação sobre o processo de solução, permitindo que boas soluções sejam obtidas rapidamente a partir de numerosas alternativas. Embora os métodos heurísticos não garantam que uma solução ótima seja encontrada, os benefícios de tempos de processamento de computador e necessidades de memória razoável são muitas vezes apontados como razões para o uso de tal abordagem.

5.2 Modelos de programação matemática como auxílio a decisões de transporte

O transporte é uma área-chave de decisão dentro da cadeia de suprimentos, representando a maior parcela dos custos logísticos, tanto numa organização, quanto na participação dos gastos logísticos em relação ao PIB em nações com relativo grau de desenvolvimento. Em função disso, a preocupação para a redução de seus custos é constante entre os profissionais da área, sendo tratada por diversos autores, como Branco et al. (2012; 2010), Novaes et al. (2011), Ballou (2006), Caixeta-Filho (2004), Grisotto (1995), Ronen (1992), Boldin & Golden (1981) e Fisher & Jaikumar (1981).

Embora as decisões de transporte se expressem de forma variada, segundo Ballou (2006), as principais são a seleção do modal, a roteirização do transportador, a programação de veículos e a consolidação do embarque, buscando-se maximizar ou minimizar uma quantidade (receita, lucro, número de produtos, custo etc.), chamada de função objetivo, que depende de um ou mais recursos escassos.

A área, portanto, que estuda a otimização desses recursos é denominada Programação Matemática, onde a função objetivo é descrita como uma função matemática dos recursos escassos, denominadas variáveis de decisão, as quais se relacionam por meio de restrições adicionadas ao modelo como equações e/ou inequações matemáticas. De forma geral, os problemas de programação matemática podem ser representados conforme esquematizado no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Representação de modelos de programação matemática

$$\begin{aligned} & \text{Otimizar: } z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Sujeito a: } & \left\{ \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq \\ = \\ \geq \end{array} \left\{ \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{array} \right\} \end{aligned}$$

em que:

x_j = representa as quantidades das variáveis utilizadas, para $j = 1, 2, \dots, n$;

b_j = representa a quantidade disponível de um determinado recurso das variáveis utilizadas, para

$j = 1, 2, \dots, m$;

X = vetor de x_j ;

$f(X)$ = função objetivo;

$g_j(X)$ = funções utilizadas nas restrições do problema;

n = número de variáveis de decisão;

m = número de restrições do modelo.

Fonte: LACHTERMACHER (2009)

Dependendo do tipo de equações utilizadas na função objetivo e nas restrições, a programação matemática pode ser caracterizada como programação não-linear, quando pelo menos uma das funções do modelo for não linear, ou programação linear (Quadro 3), onde todas as funções do modelo são representadas de modo linear.

Quadro 3 – Representação de modelos de programação linear

$$\begin{aligned} & \text{Otimizar: } z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Sujeito a: } & \begin{cases} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} \begin{cases} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{cases} \\ & \text{em que:} \\ & f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\ & b_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n, \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

Fonte: Adaptado de LACHTERMACHER (2009)

A programação linear propagou-se a partir de trabalhos publicados na área militar, em especial a partir da publicação de George B. Dantzig na década de 40. Sua pesquisa abordava o tema de distribuição ótima de tropas entre as diversas batalhas durante o período da Segunda Guerra Mundial. O Método Simplex, fruto deste esforço de pesquisa, é o algoritmo mais comentado e utilizado na literatura especializada e nos softwares de programação linear para resolução dos problemas, uma vez que permite trabalhar com várias regiões de demanda, bem como com várias regiões de oferta de matéria-prima (CAIXETA-FILHO, 2004).

Segundo Lachtermacher (2009), o advento da programação linear permitiu que os modelos de transportes incorporassem uma série de regiões de demanda e de oferta, possibilitando com isso a determinação dos fluxos de produtos de modo a minimizar o custo de transporte entre os pontos de origem-destino (Quadro 4). Quanto às restrições, tem-se, neste caso, que as fontes produtoras não podem produzir mais do que suas capacidades nominais e que as fontes consumidoras não podem receber volumes acima de suas demandas.

Quadro 4 – Representação da função objetivo de modelos de transporte

Minimizar

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

em que:

x_{ij} = quantidade de itens transportados da origem i ao destino j (variáveis de decisão);

c_{ij} = custo unitário de transporte da origem i ao destino j (constantes);

m = número de origens (fontes produtoras);

n = número de destinos (fontes consumidoras).

Fonte: Adaptado de LACHTERMACHER (2009)

O método tradicional de transporte, embora aprimorasse o modelo original, apresentava algumas limitações, consequência das seguintes pressuposições básicas (AMARO et al., 1973):

- considera um mercado em concorrência perfeita;
- não considera economia de escala no transporte;
- não considera custos de transporte até o mercado de aglomeração, nos casos de produções espacialmente dispersas;
- a tecnologia é considerada constante dentro da área de estudo;
- as ofertas e demandas de cada região são conhecidas;
- as variáveis estão linearmente inter-relacionadas;
- não considera economia de escala no processamento.

Apesar de todas as limitações de um modelo de programação linear, seu uso pode ser bastante interessante tanto para iniciativa privada quanto para o poder público, já que se caracteriza como um instrumento capaz de orientar as decisões, contribuindo, além disso, para um profundo conhecimento do problema.

Ainda de acordo com Lachtermacher (2009), uma outra derivação da programação linear, conhecida como programação linear inteira mista (PLIM), ocorre quando é inserida no modelo pelo menos uma restrição que limita o espectro de variação de uma determinada variável de decisão, a qual deve ser representada por um valor inteiro. A inclusão de variáveis binárias (do tipo 0-1) permite que sejam testadas diversas alternativas operacionais para cada região. Os resultados deste tipo de modelo podem indicar a melhor localização, a capacidade ótima de processamento ou de transporte para a região, ou o melhor grupo de colheita (manual ou mecânico) a ser adotado em determinado local produtor, conforme será abordado no presente trabalho.

Ballou (2006) afirma que a PLIM proporciona excelentes resultados para as análises de uma cadeia de suprimentos a partir do levantamento das restrições e dos objetivos de um problema. Os métodos são capazes de encontrar boas soluções, que podem ser comprovadamente ótimas. Além disso, o acréscimo ou retirada de pontos, ou mesmo a mudança nos valores dos seus parâmetros, podem ser utilizados para avaliar os efeitos, por exemplo, de variações nos custos de frete, de melhorias e/ou inclusões de novos modais de transporte, de implantação de estações de transbordo, dentre outros. A contrapartida da PLIM, no entanto, é um maior tempo de resolução requerido.

Muitos trabalhos, visando a otimização em decisões de transporte a partir de modelos matemáticos de programação inteira mista, já foram desenvolvidos, sendo alguns descritos a seguir.

No estado do Mato Grosso, Oliveira (2003) avaliou, em modelos de redes capacitadas, as rodovias na alocação modal ótima e identificou a localização ótima de novas agroindústrias, pressupondo a minimização dos custos de transportes entre as áreas de produção e processamento. A partir de uma solução padrão, vários cenários foram simulados, objetivando a melhoria da infra-estrutura de transporte da malha rodoviária e a implementação da rede ferroviária. O modelo de localização de atividades agroindustriais, por sua vez, envolveu uma estrutura de programação inteira. Os principais resultados mostraram que a pavimentação das principais rodovias estaduais no Estado produziria efeitos em termos de redução do custo total de distribuição de soja, em relação à solução padrão, sendo o efeito com a simulação da ferrovia ainda maior.

Silva Neto & Caixeta-Filho (2009) identificaram qual a melhor opção de transporte rodoviário por tipo de veículo, ou qual o melhor conjunto entre as opções disponíveis, de forma a minimizar os custos do processo de exportação de carne bovina de um frigorífico localizado na cidade de Campo Grande-MS, com destino aos portos de Santos ou Guarujá, no estado de São Paulo. Os resultados indicaram que não é uma opção minimizadora de custos o uso do porto da cidade do Guarujá, seja o transporte realizado por carreta tipo baú ou porta-contêiner.

Três alternativas de transporte (rodoviária, rodo-dutoviária e rodo-hidro-dutoviária) de etanol para exportação dentro da região Centro-Sul, representando a movimentação das unidades produtoras aos portos, foram estudadas por Rodrigues (2007). Foram geradas planilhas eletrônicas com informações sobre os custos globais de transporte para as localidades e cenários propostos, como fretes de transporte, transbordo, armazenagem e custos portuários. Os resultados demonstraram que menos da metade das alternativas envolvendo o transporte por dutos, ou por hidrovias,

apresentaram ganhos econômicos quando comparados ao transporte unicamente rodoviário. Foi ainda analisada a alternativa ferroviária como substituta do modo dutoviário, concluindo que, das 24 localidades avaliadas, 11 apresentaram ganho em relação à alternativa rodoviária.

A distribuição espacial ótima na cadeia agroindustrial canavieira aparece como tema de estudo nos trabalhos de Branco (2012) e Oliveira & Caixeta-Filho (2007).

Um modelo matemático de PLIM foi desenvolvido por Branco (2012), visando a identificação de localidades ideais para expansão ou implantação de novos canaviais, além da simulação do comportamento dos fluxos de açúcar e etanol mediante configurações distintas da malha intermodal de transporte nacional. Considerando as projeções do consumo doméstico e das exportações sucroalcooleiras para 2020/2021, o modelo matemático apontou as regiões ideais para aumento da oferta de cana-de-açúcar, sendo apresentadas em ordem de prioridade: São Paulo, Mato Grosso do Sul, Paraná, Minas Gerais, Bahia, Goiás, Tocantins, Maranhão, Mato Grosso e Piauí. A alocação ótima dos fluxos de transporte de açúcar indicou uma participação de 45% do modal ferroviário, 52% do modal rodoviário e 3% de alternativas hidro-ferroviárias na movimentação do produto. No caso do etanol, os resultados sugeriram uma proporção de 61% para a modalidade rodoviária, 27% para a alternativa ferroviária e 12% para a combinação intermodal hidro-dutoviária. A expansão da malha intermodal de transporte proporcionaria uma queda no frete unitário médio do setor de R\$ 59,12 para R\$ 54,12 por tonelada transportada.

Oliveira & Caixeta-Filho (2007) identificaram, a partir do modelo matemático de PLIM desenvolvido com o software de otimização GAMS (Quadro 5), a distribuição espacial ótima de armazéns intermodal, com as respectivas capacidades, para movimentação de açúcar a granel no estado de São Paulo. O percurso envolve o deslocamento de açúcar da usina ao porto por rodovia, ou da usina até uma unidade armazenadora, também por rodovia, seguindo para o porto por ferrovia. Foram elaborados quatro cenários, os quais se diferenciaram pelas restrições ao número de terminais que podem ser instalados na região, pelo custo operacional de armazéns instalados e pelo valor do frete ferroviário. Os resultados obtidos apontaram para a alta competitividade do transporte intermodal, quando comparado ao transporte rodoviário da usina ao porto. Além disso, confirmou-se que há espaço para aumento do market share da ferrovia na movimentação de açúcar voltado para exportação do estado.

Quadro 5 – Representação matemática da função objetivo apresentada por Oliveira & Caixeta-Filho (2007)

Minimizar

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p c_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^n d_{jk} y_{jk} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n e_{ik} z_{ik} + \sum_{j=1}^p H_j + \sum_{k=1}^n CP_k w_k$$

em que:

- c_{ij} = custo de transporte rodoviário por tonelada entre a usina i e o armazém j;
 x_{ij} = quantidade, em mil toneladas, transportada da usina i ao armazém j, por rodovia;
 d_{jk} = custo de transporte ferroviário por tonelada entre o armazém j e o porto k;
 y_{jk} = quantidade, em mil toneladas, transportada do armazém j ao porto k, por ferrovia;
 e_{ik} = custo de transporte rodoviário por tonelada entre a usina i e o porto k;
 z_{ik} = quantidade, em mil toneladas, transportada diretamente da usina i ao porto k, por rodovia;
 H_j = custo operacional do armazém em j;
 CP_k = custo portuário, por tonelada;
 w_k = quantidade de produto que chega no porto, em mil toneladas.

Decisões de transporte e estocagem dos produtos de uma cooperativa de comercialização de açúcar e etanol foram otimizadas por programação linear no estudo de Kawamura et al. (2006). Grisotto (1995) também estudou a otimização do transporte de cana em usinas produtoras de açúcar e álcool, com o intuito de solucionar questões de planejamento do transporte diário ao longo da safra, especificamente decisões quanto ao dimensionamento e gerenciamento da frota (utilização de caminhões do tipo simples, duplo ou triplo). Um modelo matemático representando as atividades envolvidas no carregamento, transporte e descarregamento de cana foi formulado a partir da associação de método exato e uma heurística, o qual se baseou na solução de um problema linear obtido pelo relaxamento das restrições de integralidade (resolvido por algoritmo de pontos interiores), sendo os valores reais aproximados para valores inteiros.

Pupulin (2010) desenvolveu um sistema de apoio, baseado em programação linear, para tomada da melhor decisão quanto à programação de colheita da cana visando a maximização total de ATR, considerando o rendimento dos diferentes cultivares e as restrições operacionais de uma usina. Na formulação da função objetivo, as fazendas foram agrupadas em grandes blocos, de acordo com particularidades do solo, do clima e relevo, enquanto as variedades foram agrupadas em grupos conforme suas curvas de maturação, manejo varietal, soqueira e reposta ao solo.

A programação diária da coleta de cana nos canaviais depende da quantidade disponível estimada em cada frente de corte e da capacidade de moagem da usina (HAHN, 1994). Programar a coleta significa tomar decisões quanto ao número de

caminhões enviados a cada frente de corte, à quantidade de cana a ser coletada, aos horários de coleta e de entrega na usina, e ao tipo e capacidade de cada caminhão. Esta escolha, por sua vez, é dependente da malha viária existente, a qual deve conter rodovias pavimentadas e em bom estado de conservação, a fim de permitir velocidades médias de deslocamento maiores.

O problema de minimização de custos de transporte da cana-de-açúcar do campo à usina de açúcar, considerando um dia de operação, foi abordado por Milan et al. (2006), que apresentaram um modelo de PLIM (Quadro 6), baseado num modelo de programação linear simples anteriormente desenvolvido por López et al. (2004). Além disso, a programação de transportes rodoviários e os tipos de corte também foram obtidos. Aspectos relacionados à qualidade, que deve ser maximizada, foram considerados por meio de um coeficiente de oportunidade determinado empiricamente, sendo estabelecidas as quantidades mínimas de cana a serem processadas, no sistema just-in-time, de modo a preservar as características organolépticas da matéria-prima. As seguintes variáveis foram consideradas na modelagem formulada no software ILOG Cplex: necessidade de fornecimento contínuo para a usina de açúcar, existência de unidades de limpeza e armazenamento no início de vias férreas, tipos de corte utilizados na colheita de cana, modais de transporte disponíveis (rodoviário e ferroviário) e rotas utilizadas.

Quadro 6 – Representação matemática da função objetivo apresentada por Milan et al. (2006)

Minimizar

$$\sum_{i=1}^{A+B} \sum_{j=1}^{A+1} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L+C+1} \sum_{m=1}^H C_{ijklm} C o_i X_{ijklm}$$

em que:

C_{ijklm} = custo de transporte, por quantidade transportada na hora do dia m e por distância percorrida no modal k, entre a origem i e o destino j

$C o_i$ = coeficiente de oportunidade, variando de 0 a 1, representando a preferência por cortar a cana-de-açúcar em cada canavial

X_{ijklm} = quantidade de cana transportada da origem i ao destino j pelo modal k utilizando o grupo de colheita l no turno do dia m.

Outros estudos relacionados à utilização de modelos de otimização como auxílio a tomada de decisões no transporte ferroviário da cana foram abordados por Masoud et al. (2011), Higgins et al. (2004) e Martin et al. (2001).

6. METODOLOGIA

Com o intuito de se analisar o potencial de inserção de novos modais de transporte na movimentação da cana-de-açúcar, e por ser a mesorregião do Triângulo Mineiro, no estado de Minas Gerais, apontada como alvo de novos investimentos por parte de grupos econômicos de outras áreas do país e do exterior (PREVITALLI et al., 2010), o presente trabalho analisou a utilização do modal ferroviário em complementação ao modal rodoviário existente nessa região, de modo que os custos de transporte sejam minimizados e a qualidade da matéria-prima seja mantida.

Esta avaliação se deu a partir do desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira mista, cuja função objetivo se caracterizou pela minimização do somatório dos custos de transporte, relacionados à movimentação de cana-de-açúcar dos canaviais às usinas, aos custos de penalização pela colheita da cana-de-açúcar realizada em momento diferente do ideal, no que diz respeito ao índice ótimo de maturação.

Dessa forma, além da linearidade presente nas relações entre as variáveis, a variável binária 0-1 foi incorporada ao modelo a fim de representar decisões do tipo “sim” ou “não”, referindo-se à utilização ou não de um grupo de colheita em determinado local produtor de cana-de-açúcar.

O modelo matemático foi, portanto, baseado em um modelo de transporte, cuja função objetivo corresponde, genericamente, à minimização do somatório do custo para

transportar uma unidade do produto no trecho origem-destino multiplicado pela quantidade a ser transportada nos respectivos trechos origem-destino. Ressalta-se que as quantidades transportadas devem respeitar as restrições de disponibilidade de produto na origem e de demanda no destino, do balanceamento entre oferta e demanda, e da condição de não-negatividade das variáveis analisadas, já implícita na forma de resolução por parte da maioria dos algoritmos de programação linear (LACHTERMACHER, 2009).

6.1 Modelo proposto

A ideia principal é modelar matematicamente, durante um determinado período da safra, o fluxo diário de cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro proveniente dos canaviais dos municípios de Água Comprida (2 pontos), Araguari (1 ponto), Araporã (1 ponto), Campo Florido (2 pontos), Comendador Gomes (2 pontos), Centralina (1 ponto), Conceição das Alagoas (2 pontos), Conquista (1 pontos), Delta (1 ponto), Fronteira (1 ponto), Frutal (2 pontos), Monte Alegre de Minas (1 ponto), Pirajuba (1 pontos), Planura (1 pontos), Prata (2 pontos), Tupaciguara (1 ponto), Uberaba (2 pontos), Uberlândia (1 ponto) e Veríssimo (2 pontos) com destino às unidades processadoras localizadas em Araporã (1 usina), Campo Florido (1 usina), Delta (1 usina) e Frutal (2 usinas), totalizando 27 pontos de origem e 5 pontos de destino final da matéria-prima.

Com relação ao trajeto da fonte produtora à usina, supõe-se que este acontece de três formas:

- pelo modal rodoviário somente; ou
- pelo modal rodoviário, da fonte produtora até um terminal ferroviário, seguindo pelo modal ferroviário até outro(s) terminal(is), e finalizando com a utilização do modal rodoviário para o deslocamento até a usina, quando esta se encontrar em posição geográfica diferente do terminal ferroviário de origem; ou
- pelo modal rodoviário, da fonte produtora até um terminal ferroviário, seguindo pelo modal ferroviário até outro(s) terminal(is), e finalizando sem a utilização de um outro modal para o deslocamento até a usina, quando esta se encontrar na mesma posição geográfica do terminal ferroviário de origem.

Observa-se que, quando se opta por realização de transbordo em terminais ferroviários, é necessário que a carga seja transportada por, no mínimo, dois terminais, antes da consequente entrega nas usinas. Além disso, tanto o transporte direto dos

canaviais às usinas, quanto dos canaviais aos terminais, acontece pelo modal rodoviário. Quanto ao deslocamento dos terminais às usinas, este pode ocorrer pelo modal rodoviário, caso a usina se localize em um ponto geográfico diferente do terminal ferroviário de origem, ou ocorrer pelo modal ferroviário, caso a usina se localize no mesmo ponto geográfico do terminal ferroviário de origem.

Matematicamente, tem-se um modelo de programação inteira, cujo foco é encontrar as quantidades que tornam a função objetivo o menor possível, mas que satisfaçam as restrições apresentadas de 1 a 12, conforme pode ser visualizado a seguir. Tal modelo foi construído a partir da compreensão e adaptação da modelagem apresentada no estudo de Milan et al. (2006).

Função Objetivo

Minimizar $Custo_{Transporte} + Custo_{Penalidade}$

sendo:

$$Custo_{Transporte} = \sum_{i \in CT} \sum_{j \in UT} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in H} \sum_{p \in P} C_{ijk} X_{ijklmp}$$

$$Custo_{Penalidade} = \sum_{i \in C} \sum_{j \in UT} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in H} \sum_{p \in P} \delta_{ip} Custo_{ATR} X_{ijklmp}$$

A função objetivo visa a minimização dos custos de transporte relacionados à movimentação de cana-de-açúcar dos canaviais às usinas, passando pelos terminais ferroviários, quando for o caso, somados aos custos de penalização pela colheita da cana-de-açúcar realizada em momento diferente do ideal, do ponto de vista do pagamento que é atribuído em função da qualidade da matéria-prima fornecida à usina.

Onde:

- X_{ijklmp} é a quantidade de cana transportada da origem i ao destino j pelo modal k utilizando o grupo de colheita l no turno do dia m e no período p , em toneladas;
- C = conjunto dos canaviais
- T = conjunto dos terminais ferroviários
- U = conjunto das usinas
- $CT = C \cup T$

- $UT = U \cup T$
- K = tipo de veículo usado, sendo que o valor 1 é usado quando o modal for ferroviário
- L = conjunto dos grupos de colheita², sendo que o valor 1 é usado quando o modal for ferroviário
- $K2 = K - \{1\}$
- $L2 = L - \{1\}$
- H = conjunto dos turnos do dia, tendo cada turno o equivalente a 6 horas de trabalho ($H \leq 4$)
- P = conjunto de dias corridos a serem analisados, considerando o período da safra ($P \leq 7$)
- C_{ijk} é o custo de transporte, em reais por tonelada transportada, no modal k , considerando a distância (em faixas pré-estabelecidas) entre a origem i e o destino j , em quilômetros;
- δ_{ip} é a diferença entre o valor estimado do rendimento de ATR do canavial i no período p e o valor máximo estimado de ATR desse mesmo canavial dentro da semana de colheita considerada, em kg por tonelada de cana;
- $Custo_{ATR}$ é o valor estimado do preço do ATR, em reais por kg de ATR (considerou-se o valor de R\$ 0,4572 / kg ATR).

Restrições

a)

$$\sum_{i \in CT} \sum_{k \in K2} \sum_{l \in L2} X_{ijklmp} \leq Smax_{jm}, \text{ para } j \in T; m \in H \text{ e } p \in P \quad (1)$$

Restrição 1: A quantidade transportada está limitada à quantidade máxima diária de cana processada por cada usina, por turno.

Onde:

- $Smax_{jm}$ é a quantidade máxima de cana que pode ser processada na usina j considerando o turno do dia m , em toneladas.

² É representado principalmente por uma máquina colhedora de cana-de-açúcar.

b)

$$\sum_{i \in T} X_{ij11mp} + \sum_{i \in C} \sum_{k \in K2} \sum_{l \in L2} X_{ijklmp} \leq SP_j, \text{ para } j \in T; m \in H \text{ e } p \in P \quad (2)$$

Restrição 2: Limita a capacidade de carga de cada terminal ferroviário³, por turno.

Onde:

➤ SP_j é a capacidade de carga do terminal ferroviário j por hora, em toneladas.

c)

$$\sum_{i \in T} X_{i(j+U)11mp} = \sum_{u \in U} \sum_{k \in K2} \sum_{l \in L2} X_{juklmp}, \text{ para } j \in T; m \in H \text{ e } p \in P \quad (3)$$

Restrição 3: Determina que o somatório da cana que chega a um terminal por ferrovia seja equivalente ao somatório da cana que sai desse mesmo terminal para as usinas, por turno.

Onde:

➤ u é um índice auxiliar que separa a usina do último terminal ferroviário.

d)

$$\sum_{j \in T} X_{j(j'+U)11mp} = \sum_{i \in C} \sum_{k \in K2} \sum_{l \in L2} X_{i(j+U)klmp}, \text{ para } j \in T; m \in H \text{ e } p \in P \quad (4)$$

Restrição 4: Determina que o total da cana que sai de um terminal por ferrovia seja equivalente ao total da cana que chega a esse mesmo terminal vindo dos canaviais.

Onde:

➤ j' é um índice auxiliar que separa o terminal origem do terminal destino.

e)

$$\sum_{j \in UT} \sum_{k \in K2} \sum_{l \in L2} \sum_{m \in H} X_{ijklmp} = Cap_i, \text{ para } i \in C \text{ e } p \in P \quad (5)$$

³ É caracterizado como o ponto de descarregamento e transbordo rodo-ferroviário para transferência da cana.

Restrição 5: Determina que cada canavial deve escoar toda a sua produção programada para a semana considerada, em toneladas.

Onde:

- Cap_i é a produção semanal do canavial i , em toneladas.

f)

$$\sum_{j \in UT} \sum_{k \in K2} X_{ijklmp} \leq Prod_l B_{ilmp}, \text{ para } i \in C; l \in L2; m \in H \text{ e } p \in P \quad (6)$$

Restrição 6: Limita a quantidade máxima diária de cana transportada nos canaviais por cada grupo de colheita, em toneladas.

Onde:

- $Prod_l$ é a quantidade de cana colhida pelo grupo de colheita l por hora, em toneladas;
- B_{ilmp} é a variável binária associada à utilização (valor 1) ou não (valor 0) de um grupo de colheita l no canavial i no turno do dia m e no período p .

g)

$$\sum_{i \in C} B_{ilmp} \leq 1, \text{ para } l \in L2; m \in H \text{ e } p \in P \quad (7)$$

Restrição 7: Determina que cada grupo de colheita trabalhe em apenas um canavial em cada turno do dia.

h)

$$\sum_{l \in L2} Y_{ilp} \leq 12, \text{ para } i \in C \text{ e } p \in P \quad (8)$$

Restrição 8: Determina que cada canavial tenha diariamente, no máximo, doze grupos de colheita trabalhando.

Onde:

- Y_{ilp} é a variável binária associada à utilização (valor 1) ou não (valor 0) de um grupo de colheita l no canavial i considerando o período p .

i)

$$\sum_{i \in C} Y_{ilp} \leq 2, \text{ para } l \in L2 \text{ e } p \in P \quad (9)$$

Restrição 9: Determina que o deslocamento de cada grupo de colheita entre os canaviais seja limitado a uma única vez ao dia.

j)

$$\sum_{m \in H} B_{ilm p} \leq |H| Y_{ilp}, \text{ para } i \in C; l \in L2 \text{ e } p \in P \quad (10)$$

Restrição 10: Determina que o trabalho de cada grupo de colheita não exceda a carga horária máxima diária permitida.

Onde:

➤ $|H|$ é o “módulo de H”, ou seja, a quantidade de turnos existentes em cada dia.

k)

$$Y_{i_1 l p} + Y_{i_2 l p} \leq 1, \text{ para } l \in L2; p \in P; i_1 \in C \text{ e } i_2 \in C / i_1 \neq i_2 \text{ e } D_{i_1 i_2} > 50 \quad (11)$$

Restrição 11: Limita o deslocamento máximo dos grupos de colheita entre os canaviais a 50 km, considerando somente um dia de trabalho.

Onde:

➤ $D_{i_1 i_2}$ é a distância entre dois canaviais, em quilômetros, sendo i_1 e i_2 índices auxiliares que separam o canavial origem (i_1) do canavial destino (i_2).

l)

$$Y_{i_1 l p_1} + Y_{i_2 l p_2} \leq 1, \text{ para } l \in L2; p_1 \in P; p_2 \in P; i_1 \in C \text{ e } i_2 \in C / p_2 = p_1 + 1; i_1 \neq i_2 \text{ e } D_{i_1 i_2} > 100 \quad (12)$$

Restrição 12: Limita o deslocamento máximo dos grupos de colheita entre os canaviais a 100 km, considerando a movimentação de um dia de trabalho para o outro.

Onde:

- p_1 e p_2 são índices auxiliares que consideram um deslocamento de um período (p_1) para o outro (p_2).

O modelo de PLIM apresentado foi processado através do software CPLEX 12.5 64 bits em um hardware Intel Core i7, 2,4 GHz com 16 GB DDR3 1600 MHz, com sistema operacional Windows 7 Pro.

6.2 Plano experimental

6.2.1 Levantamento dos dados de entrada

Os dados utilizados para a modelagem encontram-se citados abaixo, sendo apresentados de forma detalhada nos subtópicos seguintes:

- i) os custos de transporte rodoviário e ferroviário, por unidade de medida transportada e por unidade de distância percorrida;
- ii) as distâncias rodoviárias nos trechos canaviais-usinas, canaviais-terminais, terminais-usinas, e canaviais-canaviais;
- iii) as distâncias ferroviárias entre os terminais intermodais;
- iv) a capacidade de carga dos terminais ferroviários;
- v) a quantidade de cana fornecida às usinas durante a safra;
- vi) a capacidade de produção dos canaviais;
- vii) os valores correspondentes à concentração total de açúcares (ATR) nos canaviais, assim como o respectivo preço unitário;
- viii) a capacidade de corte dos grupos de colheita;
- ix) as quantidades diárias (máxima) de cana processada pelas usinas.

Ressalta-se que, em virtude do modelo proposto ser bastante complexo, decorrente do número significativo de variáveis e restrições consideradas, não foi considerada a programação das composições ferroviárias (locomotiva-vagão), como o número e tipo disponíveis, o fluxo de volta da usina, a capacidade de carga e o tempo de carregamento e descarregamento das composições, nem o tempo de movimentação dos grupos de colheita entre os canaviais selecionados. Neste caso, somente a distância máxima a ser percorrida pelos grupos de colheita entre os canaviais foi inserida como restrição do modelo computacional.

6.2.1.1 Oferta e demanda de cana-de-açúcar

No Triângulo Mineiro, são 35 municípios produtores de cana, em uma área plantada de 856.916 hectares (CANASAT, 2013), os quais compõem as 4 microrregiões de Frutal, Ituiutaba, Uberaba e Uberlândia (Quadro 7).

Quadro 7 – Municípios produtores de cana no Triângulo Mineiro

Macrorregião: Triângulo	
Microrregião	Municípios
Frutal	Campina Verde, Carneirinho, Comendador Gomes, Fronteira, Frutal, Itapajipe, Iturama, Limeira do Oeste, Pirajuba, Planura, São Francisco de Sales, União de Minas
Ituiutaba	Cachoeira Dourada, Capinópolis, Gurinhatã, Ipiacu, Ituiutaba, Santa Vitória
Uberaba	Água Comprida, Campo Florido, Conceição das Alagoas, Conquista, Delta, Uberaba, Veríssimo
Uberlândia	Araguari, Araporã, Canápolis, Cascalho Rico, Centralina, Indianópolis, Monte Alegre de Minas, Prata, Tupaciguara, Uberlândia
Total	35 municípios

Fonte: SECTES (2011)

O processamento da cana-de-açúcar, por sua vez, acontece em 22 unidades industriais, cujas identificações, localizações e produto final gerado podem ser visualizados no Quadro 8 a seguir.

Quadro 8 – Usinas processadoras de cana-de-açúcar na região do Triângulo Mineiro

	Razão Social	Cidade da Usina	Tipo de produto
1	Usina Alvorada Ltda. Açúcar e Álcool	Araporã	Etanol e Açúcar
2	Bionergética Aroeira S. A.	Tupaciguara	Etanol
3	Central Energética Açúcar e Álcool Ltda.	Limeira do Oeste	Etanol e Açúcar
4	Destilaria Cachoeira Ltda.	Tupaciguara	Etanol
5	Usina Cerradão Ltda.	Frutal	Etanol
6	Cia. Energética Vale do São Simão	Santa Vitória	Etanol e Açúcar
7	Usina Conquista de Minas Ltda.	Conquista	Açúcar
8	S. A. Usina Coruripe Açúcar e Álcool	Carneirinho	Etanol e Açúcar
9	S. A. Usina Coruripe Açúcar e Álcool	Limeira do Oeste	Etanol e Açúcar
10	S. A. Usina Coruripe Açúcar e Álcool	Campo Florido	Etanol e Açúcar
11	DAMFI - Destilaria Antônio Monti Filho	Canápolis	Etanol
12	Usina Delta S. A.	Delta	Etanol e Açúcar
13	Usina Delta S. A.	Conceição das Alagoas	Etanol e Açúcar
14	Usina Frutal Açúcar e Álcool S. A.	Frutal	Etanol e Açúcar
15	Usina Itapagipe Açúcar e Álcool Ltda.	Itapagipe	Etanol e Açúcar
16	Ituiutaba Bioenergia Ltda.	Ituiutaba	Etanol e Açúcar
17	S. A. Usina Iturama Coruripe Açúcar e Álcool	Iturama	Etanol e Açúcar
18	Usina Santo Angelo Ltda.	Pirajuba	Etanol e Açúcar
19	Laginha Agro Industrial S. A.	Canápolis	Etanol e Açúcar
20	Usina Uberaba S. A.	Uberaba	Etanol
21	Laginha Agro Industrial S. A.	Capinópolis	Etanol e Açúcar
22	Vale do Tijuco Açúcar e Álcool Ltda.	Uberaba	Etanol e Açúcar

Fonte: MAPA (2011)

Para a obtenção de dados referentes à quantidade de cana produzida na região do Triângulo Mineiro na safra 2012/2013, cinco, das doze Associações de Cana-de-Açúcar presentes na região, forneceram informações e compuseram os dados da pesquisa. No Quadro 9, são apresentados os dados das associações participantes, como os municípios dos associados, com as respectivas área plantada e produtividade média, e o destino da produção de cada associação.

Quadro 9 – Associados, área plantada e rendimento médio dos respectivos municípios associados, e destino da cana por cada associação, considerando a safra 2012/2013

Associação	Município dos associados	Área plantada por município (ha)	Produtividade média (t/ha)	Destino da cana
Associação 1	Planura	8.503	75	Usinas U2 e U4
	Fronteira	5.997		
Associação 2	Araporã	2.398	77,5	Usina U1
	Centralina	1.213		
Associação 3	Conceição das Alagoas	3.256	87,5	Usina U5
	Uberaba	3.744		
Associação 4	Campo Florido	9.907	86	Usina U3
	Pirajuba	7.926		
	Prata	6.227		
	Frutal	17.374		
	Comendador Gomes	566		
Associação 5	Conquista	4.319	85	Usina U5

Fonte: Dados da Pesquisa

Além disso, com o intuito de limitar uma área geográfica na sua totalidade, analisando dados de todos os municípios dispostos num mesmo espaço geográfico, sem lacunas, buscou-se informações sobre estes outros municípios vizinhos, tomando como parâmetro o Quadro 9. Os valores relacionados à área plantada por tais municípios foram estimados a partir da relação entre os dados dos municípios citados pelas associações (Quadro 9) e dados obtidos pelo Canasat (2013), referentes à área plantada do respectivo município, representando uma média de 52%. Quanto às respectivas produtividade média, a mesma foi calculada como sendo uma média dos rendimentos dispostos no Quadro 9. No Quadro 10, encontram-se os dados destes outros municípios, como as estimativas das áreas plantadas e produtividade média.

Quadro 10 – Outros municípios, estimativas de área plantada e rendimento médio, considerando a safra 2012/2013

Município	Área plantada por município (ha)	Produtividade média (t/ha)
Uberlândia	5.498	83
Monte Alegre de Minas	6.606	
Tupaciguara	5.679	
Araguari	872	
Veríssimo	7.026	
Delta	2.071	
Água Comprida	9.006	

Fonte: Dados da Pesquisa

Conforme mostrado nos Quadros 8 e 9, o escopo dos canaviais envolvidos na pesquisa passa então a ser limitado por 19 municípios, os quais foram, por sua vez, subdivididos em aglomerados de um ou dois pontos (canaviais), dependendo da distribuição das áreas produtoras de cana no município. A quantidade produzida de cana na safra 2012/2013, por cada município considerado no presente trabalho, foi calculada multiplicando-se a dimensão de área plantada pela produtividade média do município apresentados nos Quadros 8 e 9. A relação dos canaviais, assim como a correspondente localização e quantidade de cana produzida na safra 2012/2013, podem ser observadas no Quadro 11 a seguir.

Quadro 11 – Canaviais, municípios correspondentes e quantidade produzida por cada canavial, considerando a safra 2012/2013

	Canaviais	Municípios	Quantidade produzida na safra (t)
1	PL1	Planura	637.705
2	FN1	Fronteira	449.795
3	AR1	Araporã	185.820
4	CN1	Centralina	94.008
5	CA1	Conceição das Alagoas	142.443
6	CA2		142.443
7	UB1	Uberaba	163.807,5
8	UB2		163.807,5
9	CF1	Campo Florido	426.006
10	CF2		426.006
11	PJ1	Pirajuba	681.610
12	PT1	Prata	267.776
13	PT2		267.776
14	FL1	Frutal	747.069
15	FL2		747.069
16	CG1	Comendador Gomes	24.343
17	CG2		24.343
18	CQ1	Conquista	367.115
19	UD1	Uberlândia	455.853
20	MA1	Monte Alegre de Minas	547.778
21	TG1	Tupaciguara	470.859
22	AG1	Araguari	72.331
23	VR1	Veríssimo	291.297
24	VR2		291.297
25	DE1	Delta	171.760
26	AC1	Água Comprida	373.382
27	AC2		373.382
TOTAL			9.006.881

Fonte: Dados da Pesquisa

A partir das informações prestadas pelas associações sobre o destino da cana-de-açúcar para processamento, procedeu-se ao levantamento de informações sobre as usinas apontadas no Quadro 9, as quais também foram objeto de estudo.

A moagem de cana na safra 2012/2013 foi obtida mediante consulta à Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais (SIAMIG). Ainda conforme dados da SIAMIG, uma safra corresponde a aproximadamente 200 dias de processamento de cana nas usinas, sendo que as usinas trabalham, em média, com 80% da sua capacidade produtiva. Esses números podem ser visualizados no Quadro 12 a seguir.

Quadro 12 – Usinas, moagem na safra 2012/2013 e quantidade máxima de processamento diário

	Usina	Cidade da Usina	Moagem de cana na safra (t)	Quantidade máxima a ser processada (t/dia)
1	Usina U1	Araporã	1.783.003	11.143,77
2	Usina U2	Frutal	2.107.020	13.168,88
3	Usina U3	Campo Florido	2.877.078	17.981,74
4	Usina U4	Frutal	1.626.854	10.167,84
5	Usina U5	Delta	4.068.857	25.430,36
TOTAL			12.462.812	77.892,58

Fonte: Dados da Pesquisa

6.2.1.2 Distâncias e custos de transporte

Primeiramente, foi realizado o mapeamento da amostra, que corresponde à identificação geográfica das vinte e sete fontes produtoras e das cinco unidades processadoras de cana-de-açúcar abordadas no tópico 6.2.1.1. A partir de consultas ao Ministério dos Transportes (MT, 2012b) e Revista Ferroviária (RF, 2013), foram também levantadas informações geográficas das malhas ferroviárias e dos terminais intermodais disponíveis, assim como de outros prováveis pontos de transbordo para o carregamento e descarregamento rodo-ferroviário para transferência da cana na região analisada. A Figura 7 foi elaborada a partir destas informações.

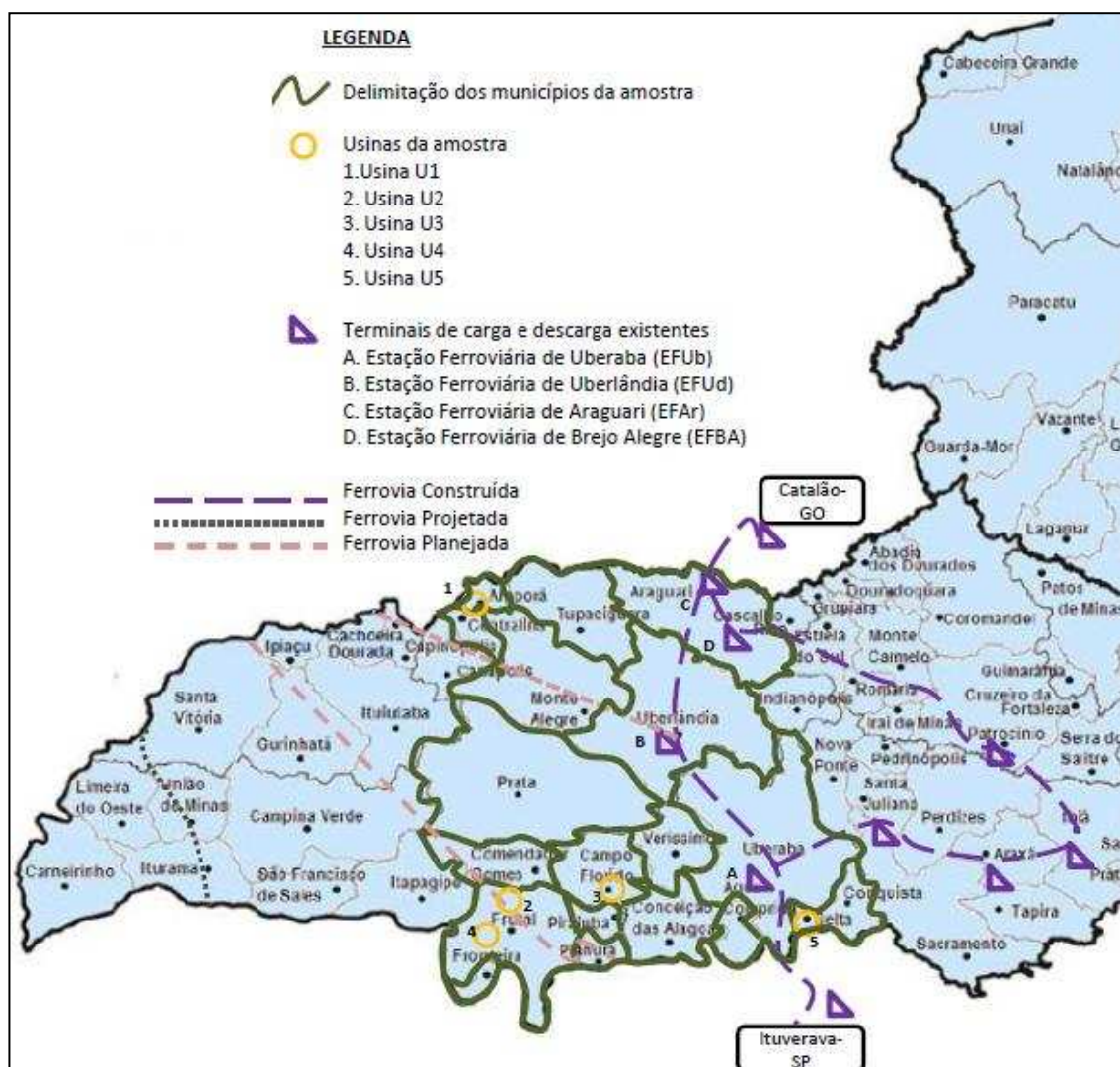


Figura 7 – Representação gráfica dos municípios e usinas considerados na coleta de dados, dos terminais ferroviários existentes, e das malhas ferroviárias construídas, planejadas e projetada na região do Triângulo Mineiro e proximidades.

De acordo com a Figura 7, constata-se a existência de quatro terminais ferroviários na região do Triângulo Mineiro: Estação Ferroviária de Uberaba (EFUB), Estação Ferroviária de Uberlândia (EFUD), Estação Ferroviária de Araguari (EFAR) e Estação Ferroviária de Brejo Alegre (EFBA) – localizada no município de Araguari-MG.

O instrumento utilizado para encontrar as distâncias rodoviárias – entre os canaviais e as usinas, os canaviais e os terminais e os terminais e as usinas –, foi o aplicativo Google Earth 2013. Este aplicativo também foi adotado no cálculo das distâncias ferroviárias entre os terminais intermodais, a partir da marcação manual dos trechos a serem percorridos. Para cada ponto de origem (canavial ou terminal) e cada ponto de destino (terminal ou usina), a análise das alternativas logísticas possíveis

considerou um caminho convergente ente os pontos. No Quadro 13, encontra-se tabulada a distância entre cada ponto origem-destino.

Quadro 13 – Distâncias ferroviárias e rodoviárias, entre a origem i e o destino j, em quilômetros

	Trechos Ferroviários								
	U1	U2	U3	U4	U5	EFBA	EFAr	EFUd	EFUb
EFBA	-	-	-	-	-	0,0	10,4	57,3	186,3
EFAr	-	-	-	-	-	10,4	0,0	46,9	175,9
EFUd	-	-	-	-	-	57,3	46,9	0,0	129,0
EFUb	-	-	-	-	-	186,3	175,9	129,0	0,0
	Trechos Rodoviários								
	U1	U2	U3	U4	U5	EFBA	EFAr	EFUd	EFUb
EFBA	139,0	200,0	187,0	227,0	174,0	-	-	-	-
EFAr	125,0	206,0	194,0	234,0	181,0	-	-	-	-
EFUd	134,0	170,0	157,0	197,0	139,0	-	-	-	-
EFUb	240,0	154,0	85,5	158,0	38,4	-	-	-	-
PL1	247,0	65,2	69,4	66,4	117,0	222,0	230,0	188,0	90,3
FN1	236,0	54,3	123,0	37,5	210,0	253,0	261,0	223,0	184,0
AR1	8,1	173,0	161,0	201,0	273,0	166,0	134,0	135,0	241,0
CN1	18,8	177,0	165,0	204,0	276,0	169,0	145,0	139,0	244,0
CA1	219,0	90,9	50,2	92,0	105,0	210,0	218,0	176,0	78,4
CA2	257,0	134,0	88,2	135,0	106,0	206,0	214,0	172,0	74,7
UB1	288,0	185,0	117,0	190,0	28,4	181,0	188,0	147,0	44,6
UB2	215,0	213,0	144,0	219,0	104,0	107,0	115,0	73,2	72,3
CF1	148,0	47,0	21,4	74,1	131,0	165,0	173,0	135,0	104,0
CF2	186,0	85,2	16,8	112,0	109,0	203,0	211,0	179,0	82,2
PJ1	189,0	88,1	19,7	66,1	112,0	206,0	214,0	182,0	85,0
PT1	142,0	48,5	36,2	75,6	146,0	159,0	167,0	129,0	119,0
PT2	78,8	104,0	91,9	131,0	202,0	149,0	157,0	119,0	175,0
FL1	231,0	49,4	118,0	22,2	205,0	248,0	256,0	218,0	179,0
FL2	180,0	1,9	66,6	29,0	176,0	197,0	204,0	167,0	150,0
CG1	201,0	50,8	87,6	77,9	197,0	218,0	226,0	188,0	171,0
CG2	170,0	19,7	56,5	46,8	166,0	187,0	194,0	157,0	140,0
CQ1	304,0	201,0	133,0	206,0	29,9	197,0	204,0	162,0	60,5
UD1	177,0	146,0	73,7	173,0	134,0	86,7	95,6	56,0	101,0
MA1	72,0	144,0	145,0	172,0	245,0	135,0	144,0	106,0	212,0
TG1	57,8	201,0	201,0	228,0	231,0	85,0	74,6	92,4	198,0
AG1	150,0	215,0	215,0	242,0	176,0	20,5	26,3	44,8	143,0
VR1	209,0	100,0	34,2	101,0	80,8	182,0	191,0	149,0	53,4
VR2	186,0	122,0	68,0	149,0	106,0	120,0	129,0	89,0	73,5
DE1	265,0	177,0	105,0	177,0	5,0	166,0	175,0	134,0	29,8
AC1	288,0	149,0	128,0	150,0	47,8	189,0	198,0	157,0	60,0
AC2	257,0	130,0	97,0	130,0	55,5	158,0	167,0	125,0	28,8

Fonte: Dados da Pesquisa

Com relação aos custos de transporte, a determinação se deu em função do tipo de carga e volume a ser transportado, e da modalidade de transporte a ser adotada, considerando a distância a ser percorrida em faixas pré-estabelecidas.

Os custos rodoviários foram estimados a partir de tabela fornecida pelas Associações de Cana-de-Açúcar, cujos valores da tonelada transportada ($= y$) variam a cada cinco quilômetros percorridos ($= x$), até um limite de 145 km. Dessa forma, tem-se dados por tonelada transportada, e não por quilômetro percorrido. A estimativa para distâncias maiores se deu a partir do uso de ferramentas estatísticas para construção de linha de tendência ($y = 0,8607x + 2,585$ e $R^2 = 0,9978$). Ressalta-se que o transporte da cana propriamente dito apresenta-se como uma atividade totalmente terceirizada na região.

Já os custos ferroviários ($= y'$) foram obtidos em publicação do Diário Oficial da União (DOU, 2012) sobre a revisão das tarifas de referência do serviço de transporte ferroviário de cargas da Ferrovia Centro-Atlântica. Em virtude da cana-de-açúcar ainda não ser transportada por ferrovias brasileiras, considerou-se os índices para a mercadoria “Demais Produtos” ($y' = 0,0949x' + 19,45$, sendo x' a distância a ser percorrida em quilômetros).

As estimativas dos custos rodoviários e ferroviários entre cada ponto origem-destino estão organizadas no Quadro 14 a seguir.

Quadro 14 – Custos ferroviários e custos rodoviários, entre a origem i e o destino j, em reais por tonelada transportada

Custos Ferroviários									
	U1	U2	U3	U4	U5	EFBA	EFAr	EFUd	EFUb
EFBA	-	-	-	-	-	0,00	20,43	24,86	37,06
EFAr	-	-	-	-	-	20,43	0,00	23,88	36,07
EFUd	-	-	-	-	-	24,86	23,88	0,00	31,64
EFUb	-	-	-	-	-	37,06	36,07	31,64	0,00
Custos Rodoviários									
	U1	U2	U3	U4	U5	EFBA	EFAr	EFUd	EFUb
EFBA	26,68	37,01	35,29	42,18	32,71	-	-	-	-
EFAr	24,10	38,73	36,15	43,04	34,43	-	-	-	-
EFUd	25,82	31,85	30,13	37,01	26,68	-	-	-	-
EFUb	43,90	29,27	18,08	30,13	9,47	-	-	-	-
PL1	45,62	14,63	14,63	14,63	23,24	41,32	42,18	35,29	18,94
FN1	43,90	12,05	24,10	9,47	38,73	46,48	48,20	41,32	34,43
AR1	4,31	32,71	30,99	37,87	49,92	31,85	25,82	25,82	44,76
CN1	6,03	33,57	30,99	37,87	50,78	31,85	27,55	26,68	44,76
CA1	40,46	18,94	12,05	18,94	20,66	38,73	40,46	33,57	16,36
CA2	47,34	25,82	18,08	25,82	21,52	38,73	39,60	32,71	15,50
UB1	52,51	34,43	23,24	35,29	7,75	34,43	35,29	28,41	10,33
UB2	39,60	39,60	27,55	40,46	20,66	21,52	22,38	15,50	15,50
CF1	28,41	11,19	6,89	15,50	25,82	30,99	32,71	25,82	20,66
CF2	35,29	18,08	6,03	22,38	21,52	37,87	39,60	33,57	17,22
PJ1	35,29	18,08	6,03	14,63	22,38	38,73	39,60	34,43	17,22
PT1	27,55	11,19	9,47	16,36	28,41	30,13	31,85	24,96	23,24
PT2	16,36	20,66	18,94	25,82	37,87	28,41	30,13	23,24	32,71
FL1	43,04	11,19	23,24	6,89	37,87	45,62	47,34	40,46	33,57
FL2	33,57	3,45	14,63	7,75	33,57	37,01	37,87	31,85	28,41
CG1	37,87	12,05	18,08	16,36	37,01	40,46	42,18	35,29	32,71
CG2	31,85	6,03	12,91	11,19	31,85	35,29	36,15	30,13	26,68
CQ1	55,09	37,87	25,82	38,73	7,75	37,01	37,87	30,99	13,77
UD1	33,57	28,41	15,50	32,71	25,82	18,08	19,80	12,91	20,66
MA1	15,50	27,55	27,55	32,71	44,76	25,82	27,55	21,52	39,60
TG1	12,91	37,87	37,87	42,18	43,04	17,22	15,50	18,94	37,01
AG1	28,41	39,60	39,60	44,76	33,57	6,89	7,75	10,33	27,55
VR1	38,73	19,80	8,61	20,66	17,22	34,43	36,15	28,41	12,05
VR2	35,29	24,10	14,63	28,41	21,52	23,24	24,96	18,08	15,50
DE1	48,20	33,57	20,66	33,57	3,45	31,85	32,71	25,82	7,75
AC1	52,51	28,41	24,96	28,41	11,19	35,29	37,01	30,13	12,91
AC2	47,34	24,96	19,80	24,96	12,91	30,13	31,85	24,10	7,75

Fonte: Dados da Pesquisa

6.2.1.3 Caminhões e terminais intermodais

As informações relacionadas à utilização de caminhões no transporte da cana-de-açúcar dos canaviais às unidades processadoras foram obtidas a partir de consultas a acervo bibliográfico e a dados fornecidos pelas Associações de Cana-de-Açúcar.

Dessa forma, constatou-se que, na região do Triângulo Mineiro, o tipo de caminhão mais utilizado é o rodotrem, caracterizado por uma combinação de veículos de carga (dois semi-reboques) composta por um total de 9 eixos que permite o transporte de um peso bruto total combinado de 74 toneladas, e um peso líquido de aproximadamente 60 toneladas.

Quanto aos dados referentes à capacidade dos terminais intermodais, foram adotados os valores divulgados pelo estudo de mercado desenvolvido pela Revista Ferroviária (RF, 2013), conforme mostrado no Quadro 15. Para a capacidade de transbordo da cana-de-açúcar, considerou-se uma duplicação do terminal, ou seja, 100% da capacidade de carga do terminal durante o ano.

Quadro 15 – Capacidade de carga e descarga de cada terminal, considerando o total movimentado e uma projeção para a movimentação de cana-de-açúcar

	Capacidade de carga do terminal (t/ano)	Capacidade de transbordo da cana (t/dia)
EFBA – Estrada de Ferro de Brejo Alegre	4.700.000	23.500,00
EFAr – Estrada de Ferro de Araguari	28.842	144,21
EFUd – Estrada de Ferro de Uberlândia	625.000	3.125,00
EFUb – Estrada de Ferro de Uberaba	1.211.000	6.055,00

Fonte: Dados da Pesquisa

6.2.1.4 Grupos de colheita

Para a colheita da cana-de-açúcar, foi analisado apenas o grupo mecânico, em virtude da política de expansão do cultivo de cana em terrenos com declividade inferior a 15%, sendo todos os grupos constituídos por máquinas colhedoras de mesma marca/modelo (uma colhedora para cada grupo de colheita), além de outros equipamentos pertinentes às atividades de corte, carregamento e transporte da cana. Vale mencionar que, para cada colhedora em operação no campo, adota-se como regra a utilização de, pelo menos, um caminhão canavieiro com dois conjuntos de semi-reboque

(de 60 toneladas cada conjunto), para que haja descarregamento das colhedoras enquanto o caminhão esteja em trânsito.

Portanto, a determinação do número de grupos de colheita disponíveis, representado neste caso pelo número de colhedoras (próprias e terceirizadas) normalmente usadas, assim como a capacidade produtiva da mesma, foram levantadas juntamente às usinas listadas no Quadro 12, sendo dependente da quantidade de talhões e das respectivas áreas para colheita, considerando uma safra. No Quadro 16, podem ser visualizados tais valores.

Quadro 16 – Número de colhedoras disponíveis por usina com a respectiva capacidade produtiva

	Usinas	Número de colhedoras	Capacidade de colheita (t/h/colhedora)
1	Usina U1	24	30
2	Usina U2	22	
3	Usina U3	12	
4	Usina U4	27	
5	Usina U5	25	
	Somatório	110	

Fonte: Dados da Pesquisa

Ressalta-se, no entanto, que o número de grupos de colheita no modelo computacional não foi limitado por usina, já que as colhedoras poderão ser compartilhadas por todas as usinas. Este valor estimado, por sua vez, correspondeu a 100% do somatório apresentado no Quadro 16, ou seja, um L equivalente a 110 colhedoras.

Com relação às distâncias rodoviárias entre os canaviais, utilizou-se o aplicativo Google Earth 2013 para os levantamentos, conforme apresentado no Quadro 17 a seguir.

Quadro 17 – Distâncias entre os canaviais, em quilômetros

	PL1	FN1	AR1	CN1	CA1	CA2	UB1	UB2	CF1	CF2	PJ1	PT1	PT2	FL1
PL1	0,0	94,3	244,0	244,0	34,3	64,5	124,0	161,0	115,0	40,8	29,4	116,0	170,0	90,8
FN1	94,3	0,0	233,0	233,0	125,0	155,0	214,0	252,0	105,0	98,3	95,0	105,0	159,0	42,9
AR1	244,0	233,0	0,0	28,7	226,0	310,0	288,0	207,0	150,0	206,0	209,0	141,0	130,0	237,0
CN1	244,0	233,0	28,7	0,0	219,0	304,0	282,0	201,0	143,0	200,0	203,0	135,0	124,0	231,0
CA1	34,3	125,0	226,0	219,0	0,0	53,2	112,0	150,0	64,0	12,9	18,6	78,0	132,0	120,0
CA2	64,5	155,0	310,0	304,0	53,2	0,0	96,7	135,0	108,0	91,4	75,3	122,0	177,0	151,0
UB1	124,0	214,0	288,0	282,0	112,0	96,7	0,0	113,0	137,0	121,0	124,0	151,0	206,0	211,0
UB2	161,0	252,0	207,0	201,0	150,0	135,0	113,0	0,0	172,0	155,0	158,0	132,0	120,0	247,0
CF1	115,0	105,0	150,0	143,0	64,0	108,0	137,0	172,0	0,0	44,0	47,0	12,6	73,1	104,0
CF2	40,8	98,3	206,0	200,0	12,9	91,4	121,0	155,0	44,0	0,0	13,5	58,5	113,0	95,2
PJ1	29,4	95,0	209,0	203,0	18,6	75,3	124,0	158,0	47,0	13,5	0,0	61,5	116,0	91,8
PT1	116,0	105,0	141,0	135,0	78,0	122,0	151,0	132,0	12,6	58,5	61,5	0,0	59,9	101,0
PT2	170,0	159,0	130,0	124,0	132,0	177,0	206,0	120,0	73,1	113,0	116,0	59,9	0,0	156,0
FL1	90,8	42,9	237,0	231,0	120,0	151,0	211,0	247,0	104,0	95,2	91,8	101,0	156,0	0,0
FL2	75,7	65,0	193,0	186,0	105,0	136,0	196,0	183,0	59,0	59,6	56,3	56,8	111,0	62,1
CG1	119,0	109,0	186,0	180,0	149,0	179,0	239,0	177,0	73,6	104,0	101,0	71,4	104,0	79,0
CG2	86,3	75,5	174,0	168,0	116,0	146,0	206,0	165,0	40,5	71,4	68,0	38,3	92,7	72,7
CQ1	144,0	234,0	309,0	302,0	133,0	117,0	52,4	132,0	157,0	140,0	143,0	202,0	280,0	230,0
UD1	122,0	201,0	164,0	164,0	103,0	128,0	136,0	29,3	96,8	79,9	82,9	102,0	90,1	198,0
MA1	211,0	199,0	62,5	62,6	184,0	229,0	247,0	166,0	108,0	165,0	168,0	100,0	89,1	196,0
TG1	282,0	256,0	69,0	82,3	270,0	255,0	233,0	152,0	165,0	222,0	225,0	157,0	93,8	253,0
AG1	227,0	270,0	161,0	175,0	216,0	200,0	178,0	97,5	179,0	222,0	225,0	171,0	159,0	267,0
VR1	53,1	129,0	199,0	199,0	34,4	59,9	82,8	119,0	57,3	40,5	43,5	71,2	126,0	125,0
VR2	116,0	177,0	176,0	176,0	97,2	123,0	108,0	62,4	91,0	74,2	77,2	77,5	102,0	174,0
DE1	116,0	205,0	270,0	270,0	104,0	88,7	23,3	104,0	128,0	111,0	114,0	142,0	197,0	202,0
AC1	88,2	178,0	293,0	293,0	76,8	61,4	32,3	127,0	151,0	134,0	99,0	165,0	220,0	175,0
AC2	68,3	158,0	262,0	262,0	56,9	41,4	57,5	95,4	120,0	103,0	79,0	134,0	188,0	155,0

Quadro 17 – Distâncias entre os canaviais, em quilômetros (continuação)

	FL2	CG1	CG2	CQ1	UD1	MA1	TG1	AG1	VR1	VR2	DE1	AC1	AC2
PL1	75,7	119,0	86,3	144,0	122,0	211,0	282,0	227,0	53,1	116,0	116,0	88,2	68,3
FN1	65,0	109,0	75,5	234,0	201,0	199,0	256,0	270,0	129,0	177,0	205,0	178,0	158,0
AR1	193,0	186,0	174,0	309,0	164,0	62,5	69,0	161,0	199,0	176,0	270,0	293,0	262,0
CN1	186,0	180,0	168,0	302,0	164,0	62,6	82,3	175,0	199,0	176,0	270,0	293,0	262,0
CA1	105,0	149,0	116,0	133,0	103,0	184,0	270,0	216,0	34,4	97,2	104,0	76,8	56,9
CA2	136,0	179,0	146,0	117,0	128,0	229,0	255,0	200,0	59,9	123,0	88,7	61,4	41,4
UB1	196,0	239,0	206,0	52,4	136,0	247,0	233,0	178,0	82,8	108,0	23,3	32,3	57,5
UB2	183,0	177,0	165,0	132,0	29,3	166,0	152,0	97,5	119,0	62,4	104,0	127,0	95,4
CF1	59,0	73,6	40,5	157,0	96,8	108,0	165,0	179,0	57,3	91,0	128,0	151,0	120,0
CF2	59,6	104,0	71,4	140,0	79,9	165,0	222,0	222,0	40,5	74,2	111,0	134,0	103,0
PJ1	56,3	101,0	68,0	143,0	82,9	168,0	225,0	225,0	43,5	77,2	114,0	99,0	79,0
PT1	56,8	71,4	38,3	202,0	102,0	100,0	157,0	171,0	71,2	77,5	142,0	165,0	134,0
PT2	111,0	104,0	92,7	280,0	90,1	89,1	93,8	159,0	126,0	102,0	197,0	220,0	188,0
FL1	62,1	79,0	72,7	230,0	198,0	196,0	253,0	267,0	125,0	174,0	202,0	175,0	155,0
FL2	0,0	58,0	24,9	206,0	151,0	149,0	206,0	220,0	82,0	126,0	183,0	155,0	135,0
CG1	58,0	0,0	35,0	211,0	146,0	144,0	201,0	215,0	125,0	143,0	196,0	203,0	183,0
CG2	24,9	35,0	0,0	191,0	135,0	133,0	190,0	204,0	91,9	110,0	163,0	170,0	150,0
CQ1	206,0	211,0	191,0	0,0	156,0	267,0	253,0	199,0	103,0	129,0	32,0	109,0	78,2
UD1	151,0	146,0	135,0	156,0	0,0	131,0	136,0	104,0	77,3	34,0	128,0	151,0	119,0
MA1	149,0	144,0	133,0	267,0	131,0	0,0	85,6	152,0	166,0	143,0	237,0	260,0	229,0
TG1	206,0	201,0	190,0	253,0	136,0	85,6	0,0	100,0	231,0	161,0	216,0	239,0	207,0
AG1	220,0	215,0	204,0	199,0	104,0	152,0	100,0	0,0	185,0	136,0	169,0	192,0	161,0
VR1	82,0	125,0	91,9	103,0	77,3	166,0	231,0	185,0	0,0	71,6	74,6	97,7	66,4
VR2	126,0	143,0	110,0	129,0	34,0	143,0	161,0	136,0	71,6	0,0	101,0	124,0	92,3
DE1	183,0	196,0	163,0	32,0	128,0	237,0	216,0	169,0	74,6	101,0	0,0	45,8	53,5
AC1	155,0	203,0	170,0	109,0	151,0	260,0	239,0	192,0	97,7	124,0	45,8	0,0	33,5
AC2	135,0	183,0	150,0	78,2	119,0	229,0	207,0	161,0	66,4	92,3	53,5	33,5	0,0

Fonte: Dados da Pesquisa

6.2.1.5 Qualidade da cana

Atualmente, a cana-de-açúcar é normalmente paga através do Sistema Consecana, desenvolvido pela UNICA e ORPLANA, representados pelas usinas e fornecedores, respectivamente, o qual considera tanto a quantidade de cana entregue quanto a qualidade.

De acordo com Consecana (2006), entende-se por qualidade da cana-de-açúcar a concentração total de açúcares (sacarose, glicose e frutose) recuperáveis no processo industrial, na forma de açúcar ou etanol. A esse conjunto de açúcares dá-se o nome de Açúcar Total Recuperável (ATR), expresso em quilogramas de açúcar por tonelada de cana. Essa variável é empregada no pagamento da matéria-prima ao produtor, já que as usinas realizam testes em amostras no momento da recepção na indústria para avaliação da qualidade.

O pagamento ao produtor, portanto, é balizado levando em consideração as toneladas de cana-de-açúcar produzidas juntamente com os quilos de ATR presentes nestas toneladas, sendo quantificado pela multiplicação entre o preço do ATR, em R\$/kg ATR, e a concentração de açúcares na cana, em kg ATR/t (CONSECANA, 2006).

Os rendimentos mensais do ATR da cana para a região de Minas Gerais na safra 2013/2014, assim como os respectivos preços médios unitários divulgados pelo Consecana do Estado de São Paulo, são apresentados nas Figuras 8 e Quadro 18. Pelo fato do Estado de Minas Gerais não possuir uma metodologia própria para pagamento da cana-de-açúcar, são adotados normalmente os dados do Consecana de São Paulo.

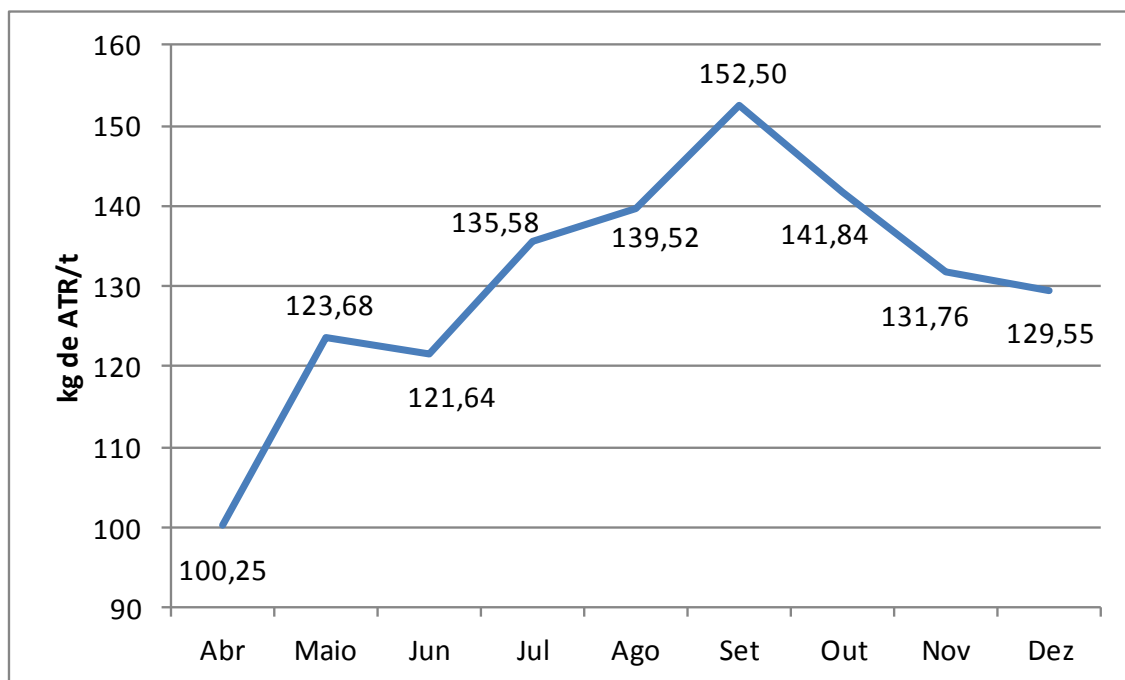


Figura 8 – Curva de rendimento mensal do ATR, expresso em kg por tonelada de cana, para a região de Minas Gerais na safra 2013/2014.
Fonte: MAPA (2014), UDOP (2013)

Quadro 18 – Valores de ATR divulgados pelo Consecana do Estado de São Paulo na safra 2013/2014

Safra 2013/2014	Mensal	Média Acumulada
Mês/Ano	R\$ / kg ATR	R\$ / kg ATR
Abr/2013	0,4470	0,4470
Maio	0,4363	0,4416
Jun	0,4416	0,4426
Jul	0,4415	0,4429
Ago	0,4436	0,4440
Set	0,4441	0,4439
Out	0,4412	0,4434
Nov	0,4637	0,4461
Dez	0,4831	0,4494
Jan/2014	0,4812	0,4524
Fev	0,4867	0,4553
Mar	0,4938	0,4572
Média da Safra (R\$ / kg ATR)		0,4572

Fonte: UDOP (2013)

Observa-se pela Figura 8 que o melhor mês para a colheita da cana em Minas Gerais seria setembro, em virtude de apresentar o maior indicador para o ATR, significando para as usinas maior produtividade no processamento, e para os produtores maior rentabilidade, já que os preços de ATR não sofreram variação significativa no decorrer da safra (Quadro 18). Como a colheita dos canaviais da região não poderia ser

concluída em apenas um mês, torna-se fundamental o planejamento eficiente dessa atividade, permitindo que a colheita seja feita durante toda a safra.

Todavia, mesmo com um planejamento eficiente da colheita da cana, conforme pode ser visto na Figura 8, as concentrações de açúcares na planta variam no decorrer da safra, ora com valores ascendentes, ora com valores descendentes. Partindo do pressuposto, conforme já mencionado, que o ideal seria a colheita no valor máximo de ATR (ponto de pico da Figura 8), considerou-se no modelo computacional que toda colheita realizada em momento diferente do ideal, ou seja, feita de forma antecipada ou atrasada, causaria um impacto negativo na função objetivo proposta, denominado pela variável $Custo_{Penalidade}$.

Tal custo, representado então pelo prejuízo percebido, ou melhor, pela ausência de ganho financeiro pela colheita antecipada ou atrasada da cana, foi mensurado em função da diferença de valores de ATR entre a cana colhida e o máximo estipulado para a semana de colheita considerada, do valor médio de R\$ 0,4572/kg ATR, conforme metodologia adotada pelo Consecana-SP (Quadro 18), e do volume de cana a ser transportada.

Especificamente com relação aos valores de ATR, primeiramente foram elaboradas 2 colunas (dia 1 e dia 7) com 27 linhas, correspondendo os dados dos 27 canaviais analisados no modelo.

Para a semana de número 10, cada coluna, que correspondem aos valores de ATR para o primeiro e último dia de colheita da semana, respectivamente, foi construída a partir do somatório de dois fatores: i) da média dos rendimentos mensais do ATR da cana para a região de Minas Gerais no período de abril a dezembro de 2013 (= 130 kg ATR/t de cana), e ii) de um valor aleatório entre 0 e 1 multiplicado pela variação média semanal entre os meses de agosto e setembro de 2013 (= 3,25 kg ATR/t de cana), sendo estes valores obtidos a partir do tratamento dos dados constantes na Figura 8. Os valores para cada coluna podem ser visualizados no Quadro 19 a seguir.

Quadro 19 – ATR nos dias 1 e 7 da semana de número 10, em quilo de açúcar por tonelada de cana

Canavial	Dia 1	Dia 7	Máximo ATR
PL1	130,46	131,56	131,56
FN1	132,58	131,97	132,58
AR1	131,85	130,06	131,85
CN1	132,20	131,26	132,20
CA1	130,50	130,57	130,57
CA2	133,24	131,45	133,24
UB1	131,83	132,99	132,99
UB2	132,91	131,73	132,91
CF1	132,70	132,98	132,98
CF2	133,19	130,59	133,19
PJ1	130,01	132,42	132,42
PT1	130,92	132,47	132,47
PT2	132,67	132,03	132,67
FL1	132,02	132,09	132,09
FL2	131,51	132,24	132,24
CG1	130,37	132,21	132,21
CG2	132,96	131,63	132,96
CQ1	132,20	132,80	132,80
UD1	131,74	130,52	131,74
MA1	130,65	132,45	132,45
TG1	130,60	133,05	133,05
AG1	131,90	131,70	131,90
VR1	131,97	130,55	131,97
VR2	131,91	130,75	131,91
DE1	130,33	132,20	132,20
AC1	130,69	131,37	131,37
AC2	130,98	130,24	130,98

A partir da geração dessas duas colunas, foram obtidos os valores aleatórios entre 130,00 (valor inferior) e 133,25 (valor superior) kg ATR/t de cana para cada canavial, por distribuição uniforme, representando os valores extremos da semana de número 10, a contar do início da safra, quando se avalia individualmente o primeiro e sétimo dia da semana. A semana de número 10 foi selecionada para as primeiras análises em virtude dela representar uma colheita aproximadamente no meio da temporada, cujo momento da safra apresenta conforme Figura 8, os maiores valores de rendimento do ATR

No modelo computacional proposto, por sua vez, foi considerado, para cada canavial e cada dia de colheita, a diferença entre o valor estimado do rendimento de ATR do canavial i naquele dia na semana 10, e o valor máximo de ATR (obtido

aleatoriamente) desse mesmo canal dentro da semana de número 10. Tal diferença de ATR por canal e para cada dia da semana, que corresponde ao δ_{ip} , foi obtida a partir do processo matemático de interpolação, de acordo com a equação a seguir:

$$\delta_{ip} = \text{Máximo} (ATR_7, ATR_1) - [(ATR_7 - ATR_1)/6 * (p - 1) + ATR_1]$$

6.2.1.6 Cenários de análise

Com o intuito de se verificar o impacto de determinadas alterações no resultado do modelo, avaliou-se primeiramente quatro cenários, os quais se diferenciaram principalmente pelas restrições quanto ao número de terminais que podem ser utilizados no descarregamento e transbordo rodo-ferroviário, assim com as respectivas capacidades de carga, e ao custo do transporte ferroviário:

- Cenário 1 – consideração dos quatro terminais existentes na região do Triângulo Mineiro (EFUb – Estação Ferroviária de Uberaba, EFUd – Estação Ferroviária de Uberlândia, EFAr – Estação Ferroviária de Araguari e EFBA – Estação Ferroviária de Brejo Alegre) ligados pela malha ferroviária operada pela Ferrovia Centro Atlântica (Figura 7), cujas capacidades encontram-se detalhadas no Quadro 15.
- Cenário 2 – consideração dos quatro terminais existentes na região do Triângulo Mineiro, cujas capacidades encontram-se detalhadas no Quadro 15, e de um terminal simulado na cidade de Frutal (EFFL – Estação Ferroviária de Frutal). Para este terminal, supõe-se uma capacidade de instalação de 24.000 toneladas/dia (valor máximo aproximado, conforme Quadro 15) construída numa malha ferroviária também simulada pelo presente estudo, a qual ligaria os municípios de Uberaba e Iturama (Figura 9).

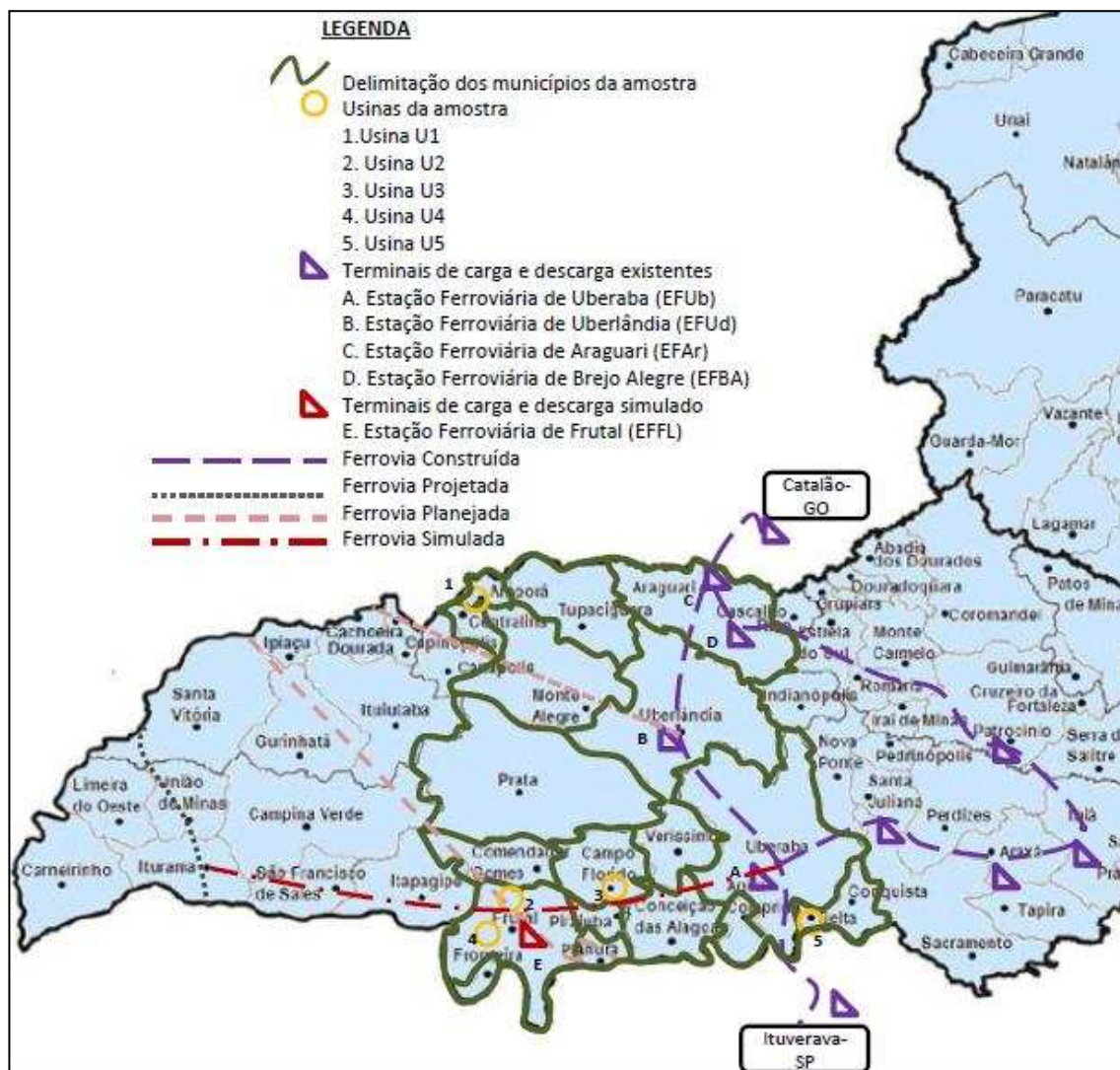


Figura 9 – Representação gráfica do cenário 2.

Salienta-se que a elaboração da Figura 9 se deu a partir da análise da representação mostrada na Figura 7. Ainda de acordo com a Figura 7, percebe-se que a cidade de Iturama encontra-se próxima a uma malha ferroviária que vem sendo projetada para a região do Triângulo Mineiro.

Nos Quadros 20 e 21, podem ser visualizadas as estimativas das distâncias e custos ferroviários e das distâncias e custos rodoviários, respectivamente, entre cada par origem-destino. Considerou-se para o terminal EFFL a mesma coordenada geográfica que a do município de Frutal.

Quadro 20 – Distâncias e custos ferroviários, entre a origem i e o destino j, em quilômetros e em reais, respectivamente, considerando a inclusão no modelo do terminal EFFL

	EFFL (em km)	EFFL (em R\$)
EFBA	351,5	52,67
EFAr	341,1	51,68
EFUd	294,2	47,25
EFUb	165,2	35,06
EFFL	0,0	0,00

Fonte: Dados da Pesquisa

Quadro 21 – Distâncias e custos rodoviários, entre a origem i e o destino j, respectivamente, considerando a inclusão no modelo do terminal EFFL

	EFFL (em km)	EFFL (em R\$/t)
U1	201,0	37,87
U2	19,7	6,03
U3	88,2	18,08
U4	16,9	6,03
U5	165,0	30,99
PL1	48,5	11,19
FN1	44,0	10,33
AR1	193,0	36,15
CN1	197,0	37,01
CA1	74,2	15,50
CA2	117,0	23,24
UB1	173,0	32,71
UB2	201,0	37,87
CF1	66,8	14,63
CF2	51,0	12,05
PJ1	48,1	11,19
PT1	68,3	14,63
PT2	124,0	24,10
FL1	39,0	9,47
FL2	21,6	6,89
CG1	70,6	15,50
CG2	39,4	9,47
CQ1	189,0	35,29
UD1	132,0	25,82
MA1	164,0	30,99
TG1	221,0	41,32
AG1	235,0	43,04
VR1	83,5	17,22
VR2	117,0	23,24
DE1	160,0	30,13
AC1	133,0	25,82
AC2	113,0	22,38

Fonte: Dados da Pesquisa

- Cenário 3 – consideração dos quatro terminais existentes na região do Triângulo Mineiro, cujas capacidades encontram-se detalhadas no Quadro 15, e de cinco terminais simulados, um terminal em cada usina (EFAP – Estação Ferroviária de Araporã em U1, EFFA – Estação Ferroviária de Frutal A em U2, EFCF – Estação Ferroviária de Campo Florido em U3, EFFB – Estação Ferroviária de Frutal B em U4, e EFDE – Estação Ferroviária de Delta em U5). Para estes terminais, supõe-se uma capacidade de instalação de 24.000 toneladas/dia (valor máximo aproximado, conforme Quadro 15) construídas numa malha ferroviária, também simulada, a qual ligaria os municípios de Araguari, Araporã, Frutal, Campo Florido, Uberaba e Delta (Figura 10).

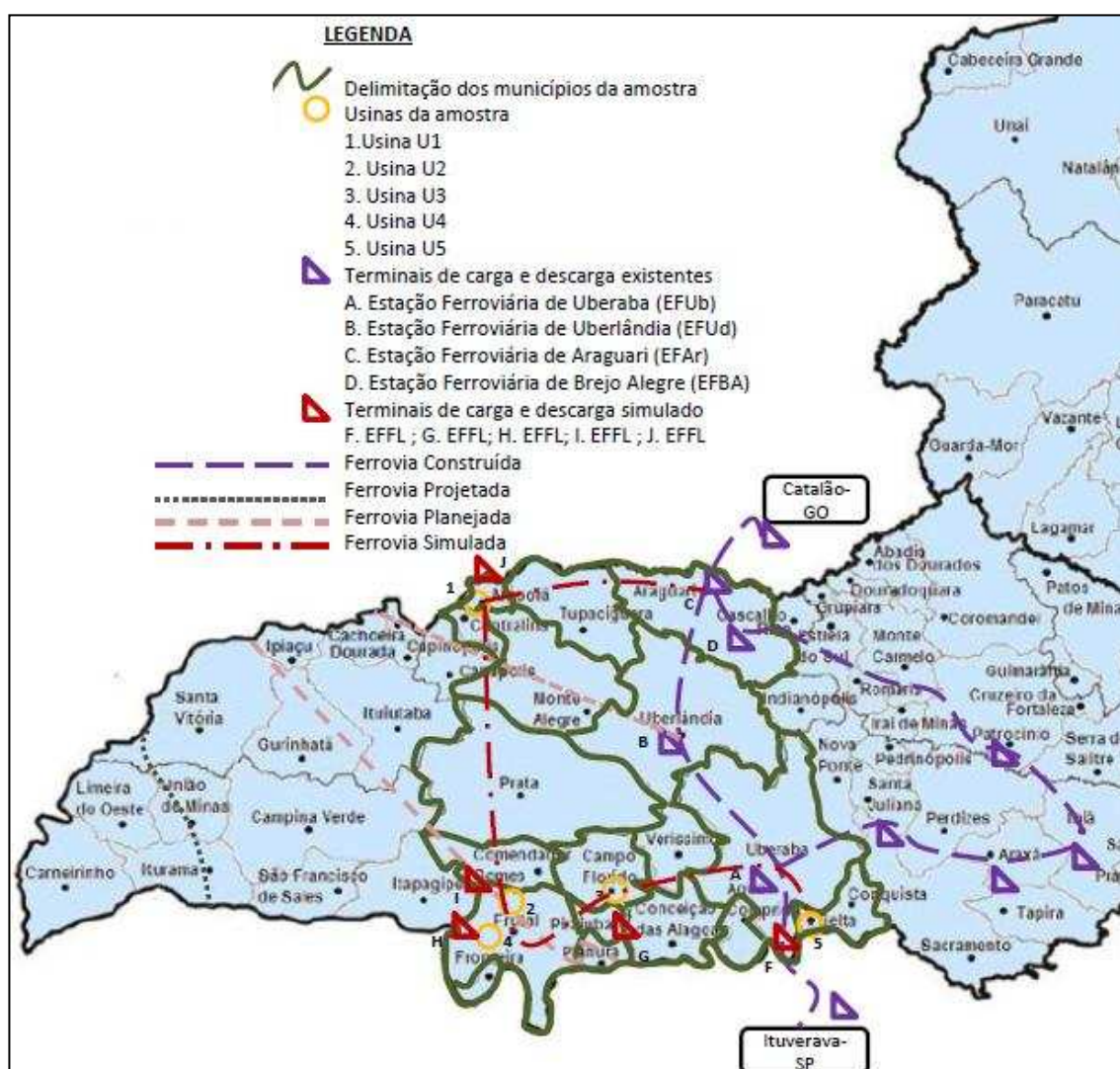


Figura 10 – Representação gráfica do cenário 3.

Salienta-se que a elaboração da Figura 10 se deu a partir da análise da representação mostrada na Figura 7.

De acordo com a Figura 10, além das ferrovias já existentes, unindo os terminais de EFBA a EFAr, EFAr a EFUd, e EFUd a EFUb, pretende-se uma ligação também entre os terminais de EFAr a EFAP, EFAP a EFFB, EFFB a EFFA, EFFA a EFCF, EFCF a EFUb, e EFUb a EFDE. Como consequência, tem-se conexões ligando os municípios de Araguari a Araporã, Araporã a Frutal, Frutal a Campo Florido, Campo Florido a Uberaba, Uberaba a Delta, Uberaba a Uberlândia, Uberlândia a Araguari e Araguari a Brejo Alegre.

Nos Quadros 22 e 23, podem ser visualizadas, entre cada novo par origem-destino, formado a partir da inclusão no modelo dos terminais EFAP, EFFA, EFCF, EFFB e EFDE, as estimativas das distâncias e dos custos ferroviários, respectivamente, e nos Quadros 24 e 25, as estimativas das distâncias e dos custos rodoviários, respectivamente. Considerou-se para os terminais EFAP, EFFA, EFCF, EFFB e EFDE as mesmas coordenadas geográficas das usinas U1, U2, U3, U4 e U5, respectivamente.

Quadro 22 – Distâncias ferroviárias, entre a origem i e o destino j, em quilômetros, considerando a inclusão no modelo dos terminais EFAP, EFFA, EFCF, EFFB e EFDE

	U1=EFAP	U2=EFFA	U3=EFCF	U4=EFFB	U5=EFDE
EFBA	157,9	368,1	287,2	400,0	231,6
EFAr	147,5	357,7	276,8	389,6	221,2
EFUd	194,4	310,8	229,9	342,7	174,3
EFUb	323,4	181,8	100,9	213,7	45,3
U1=EFAP	0,0	278,5	359,4	246,6	368,7
U2=EFFA	278,5	0,0	80,9	31,9	227,1
U3=EFCF	359,4	80,9	0,0	112,8	146,2
U4=EFFB	246,6	31,9	112,8	0,0	259,0
U5=EFDE	368,7	227,1	146,2	259,0	0,0

Fonte: Dados da Pesquisa

Quadro 23 – Custos ferroviários, entre a origem i e o destino j, em reais por tonelada transportada, considerando a inclusão no modelo dos terminais EFAP, EFFA, EFCF, EFFB e EFDE

	U1=EFAP	U2=EFFA	U3=EFCF	U4=EFFB	U5=EFDE
EFBA	34,43	54,38	46,71	57,41	41,43
EFAr	33,45	53,40	45,72	56,42	40,44
EFUd	37,90	48,94	41,27	51,97	35,99
EFUb	50,14	36,70	29,03	39,73	23,75
U1=EFAP	0,00	45,88	53,56	42,85	54,44
U2=EFFA	45,88	0,00	27,13	22,48	41,00
U3=EFCF	53,56	27,13	0,00	30,15	33,32
U4=EFFB	42,85	22,48	30,15	0,00	44,03
U5=EFDE	54,44	41,00	33,32	44,03	0,00

Fonte: Dados da Pesquisa

Quadro 24 – Distâncias rodoviárias, entre a origem i e o destino j, em quilômetros, considerando a inclusão no modelo dos terminais EFAP, EFFA, EFCF, EFFB e EFDE

	U1=EFAP	U2=EFFA	U3=EFCF	U4=EFFB	U5=EFDE
PL1	247,0	65,2	69,4	66,4	117,0
FN1	236,0	54,3	123,0	37,5	210,0
AR1	8,1	173,0	161,0	201,0	273,0
CN1	18,8	177,0	165,0	204,0	276,0
CA1	219,0	90,9	50,2	92,0	105,0
CA2	257,0	134,0	88,2	135,0	106,0
UB1	288,0	185,0	117,0	190,0	28,4
UB2	215,0	213,0	144,0	219,0	104,0
CF1	148,0	47,0	21,4	74,1	131,0
CF2	186,0	85,2	16,8	112,0	109,0
PJ1	189,0	88,1	19,7	66,1	112,0
PT1	142,0	48,5	36,2	75,6	146,0
PT2	78,8	104,0	91,9	131,0	202,0
FL1	231,0	49,4	118,0	22,2	205,0
FL2	180,0	1,9	66,6	29,0	176,0
CG1	201,0	50,8	87,6	77,9	197,0
CG2	170,0	19,7	56,5	46,8	166,0
CQ1	304,0	201,0	133,0	206,0	29,9
UD1	177,0	146,0	73,7	173,0	134,0
MA1	72,0	144,0	145,0	172,0	245,0
TG1	57,8	201,0	201,0	228,0	231,0
AG1	150,0	215,0	215,0	242,0	176,0
VR1	209,0	100,0	34,2	101,0	80,8
VR2	186,0	122,0	68,0	149,0	106,0
DE1	265,0	177,0	105,0	177,0	5,0
AC1	288,0	149,0	128,0	150,0	47,8
AC2	257,0	130,0	97,0	130,0	55,5

Fonte: Dados da Pesquisa

Quadro 25 – Custos rodoviários, entre a origem i e o destino j, em reais por tonelada transportada, considerando a inclusão no modelo dos terminais EFAP, EFFA, EFCF, EFFB e EFDE

	U1=EFAP	U2=EFFA	U3=EFCF	U4=EFFB	U5=EFDE
PL1	45,62	14,63	14,63	14,63	23,24
FN1	43,90	12,05	24,10	9,47	38,73
AR1	4,31	32,71	30,99	37,87	49,92
CN1	6,03	33,57	30,99	37,87	50,78
CA1	40,46	18,94	12,05	18,94	20,66
CA2	47,34	25,82	18,08	25,82	21,52
UB1	52,51	34,43	23,24	35,29	7,75
UB2	39,60	39,60	27,55	40,46	20,66
CF1	28,41	11,19	6,89	15,50	25,82
CF2	35,29	18,08	6,03	22,38	21,52
PJ1	35,29	18,08	6,03	14,63	22,38
PT1	27,55	11,19	9,47	16,36	28,41
PT2	16,36	20,66	18,94	25,82	37,87
FL1	43,04	11,19	23,24	6,89	37,87
FL2	33,57	3,45	14,63	7,75	33,57
CG1	37,87	12,05	18,08	16,36	37,01
CG2	31,85	6,03	12,91	11,19	31,85
CQ1	55,09	37,87	25,82	38,73	7,75
UD1	33,57	28,41	15,50	32,71	25,82
MA1	15,50	27,55	27,55	32,71	44,76
TG1	12,91	37,87	37,87	42,18	43,04
AG1	28,41	39,60	39,60	44,76	33,57
VR1	38,73	19,80	8,61	20,66	17,22
VR2	35,29	24,10	14,63	28,41	21,52
DE1	48,20	33,57	20,66	33,57	3,45
AC1	52,51	28,41	24,96	28,41	11,19
AC2	47,34	24,96	19,80	24,96	12,91

Fonte: Dados da Pesquisa

- Cenário 4 – similar ao cenário 3, porém considerando uma redução de 50% dos custos ferroviários.

Como o modelo proposto auxilia no planejamento da colheita e transporte ao longo de 7 dias (= 1 semana), a avaliação deste planejamento em outros momentos no decorrer da safra torna-se necessária para a verificação do efeito da semana analisada na saída do modelo, sobretudo com relação aos modais de transporte sugeridos (somente rodoviário ou rodoviário e ferroviário). No tópico 6.2.1.5, foi definido como momento da colheita a décima semana, a partir da início da safra.

Logo, outros três cenários foram avaliados, os quais se caracterizam como variantes do cenário 4, onde é alterado o momento para a colheita da cana, ou seja, a semana escolhida para a colheita, ou o valor do rendimento de ATR:

- Cenário 5 – similar ao cenário 4, porém considerando a colheita na primeira semana (início da safra);
- Cenário 6 – similar ao cenário 4, porém considerando a colheita na trigésima quarta semana (fim da safra). Na Figura 8, o rendimento de ATR é distribuído ao longo de 17 quinzenas (= 34 semanas); e
- Cenário 7 – similar ao cenário 4, porém considerando variação superestimada para o rendimento de ATR na décima semana.

Assim como descrito no tópico 6.1.2.5, duas colunas foram inicialmente criadas, com 27 linhas (= 27 canaviais), correspondem aos valores de ATR para o primeiro e último dia de colheita da semana.

Considerando o tratamento dos dados da Figura 8, a construção de ambas as colunas se deu a partir do somatório da média dos rendimentos mensais do ATR da cana para a região de Minas Gerais no período de abril a dezembro de 2013 (= 130 kg ATR/t de cana), e de um valor aleatório entre 0 e 1 multiplicado:

- pelo percentual de 66,7% (= 2/3) da variação média semanal entre os meses de abril e maio de 2013 (= 5,86 kg ATR/t de cana), para o cenário 5;
- pelo percentual de 66,7% (= 2/3) da variação média semanal entre os meses de novembro e dezembro de 2013 (= 0,55 kg ATR/t de cana), para o cenário 6;
- por uma alta variação estimada de ATR (= 20 kg ATR/t de cana), para o cenário 7.

Os valores inferiores e superiores das colunas 1 e 2, correspondendo respectivamente aos dias da semana 1 e 7 para os cenários 5, 6 e 7, são apresentados no Quadro 26 a seguir.

Quadro 26 – Valores inferiores e superiores de ATR para o primeiro e sétimo dia da semana, considerando os cenários 5, 6 e 7, em quilo de açúcar por tonelada de cana

	Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7	
	Dia 1	Dia 7	Dia 1	Dia 7	Dia 1	Dia 7
Valor inferior	130,00	131,95	130,18	130,00	120,00	120,00
Valor superior	133,91	135,86	130,55	130,37	140,00	140,00

Nota-se pelo Quadro 26 uma ascendência nos valores de ATR para o cenário 5 (= semana de colheita 1), uma descendência para o cenário 6 (= semana de colheita 34), e uma constância para o cenário 7 (= semana de colheita 10). Isso é explicado pelo fato de se tentar representar o comportamento real para os valores de ATR apresentados na Figura 8, lembrando que, para a semana de número 10, a curva se apresenta ora ascendente e ora descendente.

Para os cenários 5, 6 e 7, o cálculo da diferença de ATR por canavial e para cada dia da semana considerada ($= \delta_{ip}$), se deu a partir da substituição dos valores do Quadro 26 na equação de interpolação apresentada no tópico 6.1.2.5.

Na análise de todos os cenários, adotou-se, para as demais variáveis de entrada do modelo, os dados apresentados nos tópicos 6.2.1.1, 6.2.1.2, 6.2.1.3, 6.2.1.4 e 6.2.1.5.

A exemplo de Trigueiro et al. (1989), que também adotaram a programação inteira, a avaliação da solução obtida nesse estudo foi feita através da diferença percentual entre o valor da função objetivo para a melhor solução factível encontrada (limitante superior) e o valor do melhor limitante inferior, a qual é denominada de gap da solução.

De acordo com Junqueira et al. (1989), as seguintes situações são possíveis de ocorrer quanto à qualidade da solução obtida pelo aplicativo:

- solução ótima, com gap igual a zero;
- solução factível (inteira), com gap maior que zero e com o limite de tempo excedido;
- sem solução factível, sem gap e com o limite de tempo excedido; ou
- insuficiência de memória do computador para compilar o modelo, sem gap e sem informação relevante sobre o tempo.

Quanto menor for o gap da solução, melhor será o desempenho do arranjo final, pois a solução factível obtida estará mais próxima da solução ótima. Nos cenários analisados, os gaps da solução para cada modelo foram arbitrariamente limitados em 1%.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito nos objetivos, a proposta do presente trabalho é realizar a modelagem de uma situação real representada pelas operações de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar, a partir do modal rodoviário, e avaliar a alternativa de inserção do modal ferroviário.

O modelo de escoamento da cana-de-açúcar das propriedades rurais às unidades processadoras na região do Triângulo Mineiro foi implementado no software Cplex, cujo formato é apresentado na Figura 11 a seguir. Tal modelagem matemática de programação inteira mista (Apêndice A) busca minimizar o custo total, caracterizado pelo somatório dos custos de transporte da cana das propriedades rurais às unidades de processamento aos custos de penalização pela realização da colheita em momento diferente do ideal, de modo que sejam atendidas as restrições relacionadas aos canaviais, usinas, terminais ferroviários e grupos de colheita.

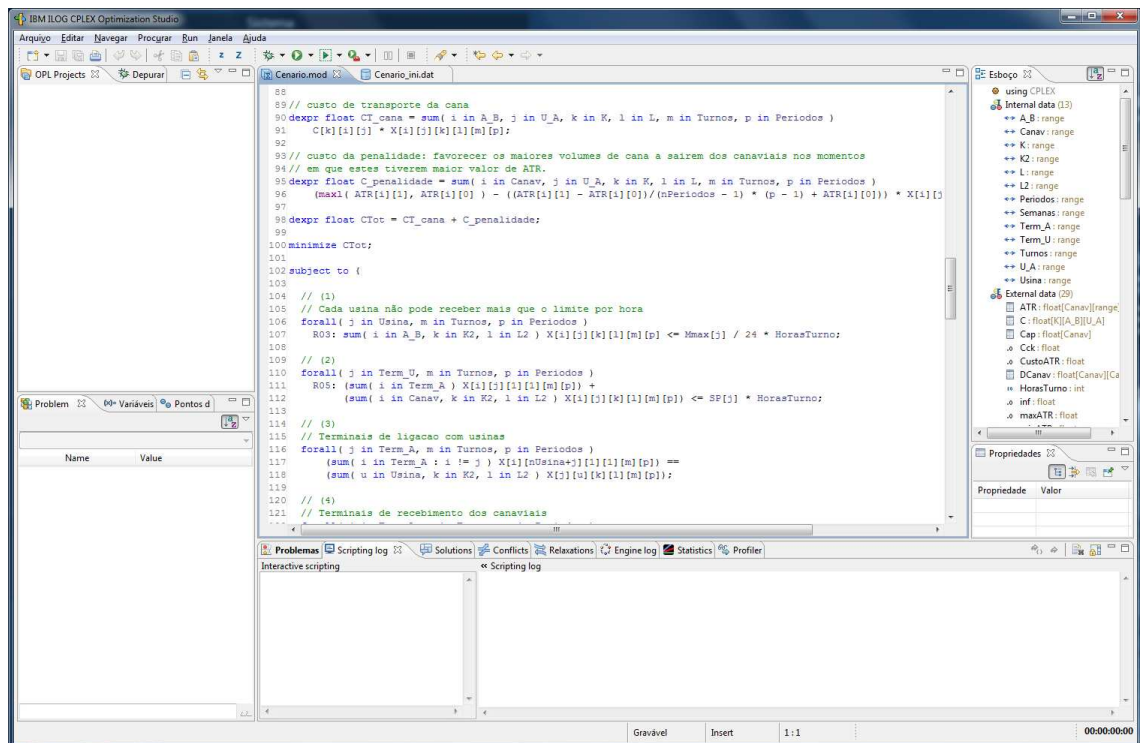


Figura 11 – Parte inicial da modelagem matemática implementada no software Cplex.

Em função da complexidade do modelo, foram obtidas respostas para somente sete dias de operação da cadeia agroindustrial canavieira.

7.1 A evolução do modelo proposto

Inicialmente, o escopo da pesquisa se limitou a 12 municípios do Triângulo Mineiro – Araporã, Campo Florido, Comendador Gomes, Centralina, Conceição das Alagoas, Conquista, Fronteira, Frutal, Uberaba, Pirajuba, Planura e Prata –, os quais foram, por sua vez, subdivididos em aglomerados de três, quatro ou cinco pontos (canaviais), dependendo da distribuição das áreas produtoras de cana no município. Esta subdivisão gerou 50 pontos, sendo, portanto, os canaviais considerados no modelo.

A amostragem referente às unidades processadoras da cana foi composta de cinco usinas, localizadas geograficamente nas cidades de Araporã (1 usina), Campo Florido (1 usina), Delta (1 usina) e Frutal (2 usinas). Esta amostra não foi alterada durante o processo de reformulação do modelo, visando a busca por melhorias.

A função objetivo (minimização) do primeiro modelo desenvolvido foi a seguinte:

$$\sum_{i \in CT} \sum_{j \in UT} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in H} \sum_{p \in P} C_{ijk} Q_{ip} X_{ijklmp} \quad \text{Equação A}$$

Onde Q_{ip} é o grau de preferência para colheita da cana na origem i e no período p , adimensional: i) Se a origem for um terminal ferroviário ($i \in T$), então o valor de $Q_{ip} = 0,1$, sendo considerado importante a passagem por este ponto; ii) Se a origem for um canavial, então $0,1 < Q_{ip} \leq 0,95$.

Neste modelo (Equação A), não foi obtida solução para $P > 1$, ou seja, somente para o primeiro dia de operação das atividades foram geradas respostas. De forma a testar a viabilidade do mesmo para sete dias de operação das usinas, e não somente um dia, um outro cenário foi analisado a partir da aglomeração da oferta da cana-de-açúcar em um único ponto por município, totalizando 12 pontos. Com esta nova configuração, o modelo foi validado para um horizonte de planejamento de uma semana. Ressalta-se, contudo, que uma das pressuposições adotadas foi de que o tempo de movimentação dos grupos de colheita entre os canaviais seria considerado como tendo valor zero, o que significa afirmar que não seria levada em consideração a distância entre os canaviais.

Contudo, almejou-se posteriormente um tratamento diferente para a variável qualidade da matéria-prima, representada até então pelo Q_{ip} , e a inclusão de restrições que limitassem o deslocamento dos grupos de colheita em função da distância entre os canaviais.

Um modelo novo foi então formulado, o qual é apresentado no presente trabalho, sendo a função objetivo (minimização) a seguinte:

$$\sum_{i \in CT} \sum_{j \in UT} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in H} \sum_{p \in P} C_{ijk} X_{ijklmp} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in UT} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in H} \sum_{p \in P} \delta_{ip} \text{Custo}_{ATR} X_{ijklmp} \quad \text{Equação B}$$

Onde o primeiro fator se refere aos custos de transporte do escoamento da cana-de-açúcar dos canaviais às usinas, e o segundo fator, aos custos de penalização pela colheita da cana-de-açúcar que acontecer em momento diferente do ideal, do ponto de vista do pagamento que é atribuído em função da qualidade da matéria-prima fornecida à usina.

Para os 50 pontos canaviais levantados inicialmente, os resultados não se apresentaram viáveis para a função objetivo apresentada na Equação B. O tempo de resolução do modelo ficou demasiadamente longo, em torno de 7 horas, apresentando ainda erros de falta de memória e cancelamento do software Cplex, em alguns cenários analisados. Neste ponto, optou-se por ampliar a quantidade de municípios do Triângulo

Mineiro a ser estudada para 19, ao invés de 12, e reduzir para 32 o número de pontos de origem (canaviais). Os resultados, novamente, mostraram-se insatisfatórios.

O escopo dos canaviais envolvidos no presente trabalho passou então a ser limitado por 27 pontos de origem, localizados em 19 municípios: Água Comprida (2 pontos), Araguari (1 ponto), Araporã (1 ponto), Campo Florido (2 pontos), Comendador Gomes (2 pontos), Centralina (1 ponto), Conceição das Alagoas (2 pontos), Conquista (1 pontos), Delta (1 ponto), Fronteira (1 ponto), Frutal (2 pontos), Monte Alegre de Minas (1 ponto), Pirajuba (1 pontos), Planura (1 pontos), Prata (2 pontos), Tupaciguara (1 ponto), Uberaba (2 pontos), Uberlândia (1 ponto) e Veríssimo (2 pontos).

Da mesma forma, foram, a princípio, avaliados cenários com utilização de somente 80 grupos de colheita, correspondendo a 72,3% do somatório apresentado no Quadro 16 ($L = 110$ colhedoras). Tal estimativa foi calculada levando-se em consideração a moagem total na safra 2012/2013, que corresponde a 12.462.812 toneladas de cana (Quadro 12), e os 19 municípios envolvidos na pesquisa, os quais foram responsáveis pela produção de 9.006.881 toneladas de cana durante o mesmo período (Quadro 10). Nestes casos, o modelo também apresentou solução inviável após 18 horas de resolução, decorrente das restrições 11 e 12 que limitam a mobilidade dos grupos de colheita. O número de colhedoras utilizadas no modelo foi então aumentado para 110 máquinas colhedoras, valor total disponível pelas cinco usinas estudadas.

Os resultados do modelo matemático acima relatado encontram-se detalhados nos tópicos a seguir, sendo apresentada no Quadro 27 uma síntese das principais características de cada cenário analisado.

Quadro 27 – Resumo das particularidades de cada cenário analisado

Cenário	Terminais ferroviários	Capacidade de transbordo da cana (t/dia)	Custos ferroviários	Semana de colheita
1	EFBA EFAr EFUd EFUb	23.500,00 144,21 3.125,00 6.055,00	Originais	Semana 10
2	EFBA EFAr EFUd EFUb EFFL	23.500,00 144,21 3.125,00 6.055,00 24.000,00	Originais	Semana 10
3	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	Originais	Semana 10
4	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	50% dos Custos Originais	Semana 10
5	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	50% dos Custos Originais	Semana 1
6	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	50% dos Custos Originais	Semana 34
7	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	50% dos Custos Originais	Semana 10, com alta variação de ATR

* Capacidade para cada estação

Conforme observado no Quadro 52, as análises podem ser divididas em quatro partes:

- i) Comparação dos resultados dos cenários 2 e 3 com o cenário 1;
- ii) Comparação do resultado do cenário 4 com o cenário 3;
- iii) Comparação do resultado do cenário 7 com o cenário 4; e
- iv) Comparação dos resultados dos cenários 5 e 6 com o cenário 4.

7.2 Cenário 1

O cenário 1 levou em consideração os terminais ferroviários existentes na região do Triângulo Mineiro (EFBA, EFAR, EFUD e EFUB), sendo indicado como solução para sete dias de operação, cuja semana foi selecionada em momento intermediário da safra (meio da safra), a utilização do modal rodoviário em todos os trechos canavial-usina. Logo, o uso do modal ferroviário não foi apontado na solução do modelo matemático para este cenário, uma vez que nenhum dos terminais ferroviários (EFBA, EFAR, EFUD ou EFUB) foi selecionado.

A programação dos grupos de colheita nos canaviais em cada dia da semana do cenário 1, assim como os modais de transporte adotados, a usina de destino e os custos envolvidos estão apresentados no Apêndice B.

No Quadro 28, estão tabulados os dados referentes aos valores diários e totais para o volume de cana transportado no decorrer de uma semana no cenário 1, assim como os custos envolvidos.

Quadro 28 – Volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade, custo total e custo por tonelada transportada no trecho canavial-usina pelo cenário 1 ao longo de uma semana

	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo por tonelada (R\$)
Dia 1	55.778,2	615.579,0	48,9	615.627,90	11,04
Dia 2	46.812,6	516.689,2	4.256,6	520.945,80	11,13
Dia 3	36.398,0	464.353,2	6.791,8	471.145,00	12,94
Dia 4	45.278,8	507.498,4	11.578,1	519.076,50	11,46
Dia 5	52.149,9	496.074,1	9.037,7	505.111,80	9,69
Dia 6	63.330,1	551.995,4	5.371,4	557.366,80	8,80
Dia 7	75.790,8	671.736,5	0,0	671.736,50	8,86
TOTAL	375.538,40	3.823.925,80	37.084,50	3.861.010,30	10,28

7.3 Cenário 2

O cenário 2 levou em consideração os terminais ferroviários existentes na região do Triângulo Mineiro (EFBA, EFAR, EFUD e EFUB) e de um terminal ferroviário simulado na cidade de Frutal (EFFL), o qual ligaria o terminal EFUD ao município de Iturama.

Assim como no cenário 1, foi indicado como solução para sete dias de operação, cuja semana foi selecionada em momento intermediário da safra (meio da safra), a

utilização do modal rodoviário em todos os trechos canavial-usina. Logo, o uso do modal ferroviário não foi apontado na solução do modelo matemático para este cenário, uma vez que nenhum dos terminais ferroviários (EFBA, EFAr, EFUd, EFUb ou EFFL) foi selecionado.

A programação dos grupos de colheita nos canaviais em cada dia da semana do cenário 2, assim como os modais de transporte adotados, a usina de destino e os custos envolvidos estão apresentados no Apêndice C.

No Quadro 29, estão tabulados os dados referentes aos valores diários e totais para o volume de cana transportado no decorrer de uma semana no cenário 2, assim como os custos envolvidos.

Quadro 29 – Volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade, custo total e custo por tonelada transportada no trecho canavial-usina pelo cenário 2 ao longo de uma semana

	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo por tonelada (R\$)
Dia 1	54.250,40	603.690,50	0,00	603.690,50	11,13
Dia 2	44.919,10	473.694,30	4.094,60	477.788,90	10,64
Dia 3	31.656,30	427.731,60	3.874,90	431.606,50	13,63
Dia 4	42.803,60	477.773,00	11.168,10	488.941,10	11,42
Dia 5	53.456,70	506.487,90	9.365,30	515.853,20	9,65
Dia 6	71.133,40	656.590,90	6.200,20	662.791,10	9,32
Dia 7	77.318,00	676.431,60	0,0	676.431,60	8,75
TOTAL	375.537,50	3.822.399,80	34.703,10	3.857.102,90	10,27

7.4 Cenário 3

O cenário 3 levou em consideração os terminais ferroviários existentes na região do Triângulo Mineiro (EFBA, EFAr, EFUd e EFUb) e de cinco terminais simulados, um terminal em cada usina (EFAP em U1 - Araporã, EFFA em U2 - Frutal, EFCE em U3 - Campo Florido, EFFB em U4 - Frutal, e EFDE em U5 - Delta), os quais ligariam os municípios de Araguari, Araporã, Frutal, Campo Florido, Uberaba e Delta.

Em função deste cenário considerar a implementação de terminais ferroviários a serem instalados na mesma localização geográfica das usinas consideradas no estudo, tornou-se necessária a adaptação do modelo apresentado no Quadro 1A (Apêndice A). Para o cenário 3, portanto, as Restrições 3 e 4 foram excluídas do modelo computacional, sendo incluída a restrição a seguir, conforme Quadro 2A (Apêndice A):

$$\sum_{i \in C} \sum_{k \in K2} \sum_{l \in L2} X_{ijklmp} = \sum_{u \in U} X_{(j-u)u11mp}, \text{ para } j \in T; m \in H \text{ e } p \in P \quad (\text{Restrição Z})$$

Onde a Restrição Z determina que o somatório da cana que chega a um terminal, por rodovia, seja equivalente ao somatório da cana enviada às usinas por ferrovia.

Da mesma forma que nos cenários 1 e 2, foi indicado como solução para sete dias de operação, cuja semana foi selecionada em momento intermediário da safra (meio da safra), a utilização do modal rodoviário em todos os trechos canavial-usina. Logo, o uso do modal ferroviário não foi apontado na solução do modelo matemático para este cenário, uma vez que nenhum dos terminais ferroviários (EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCE ou EFDE) foi selecionado.

A programação dos grupos de colheita nos canaviais em cada dia da semana do cenário 3, assim como os modais de transporte adotados, a usina de destino e os custos envolvidos estão apresentados no Apêndice D.

Com o intuito de melhor explicar os resultados do modelo matemático proposto, são descritas a seguir informações sobre os canaviais, usinas e grupos de colheita atribuídos ao cenário 3.

Para o primeiro dia de operação, de acordo com o Quadro 1D (Apêndice D), propõe-se realizar a colheita em 11 canaviais: AR1, CN1 e PT2, com destino à usina U1; CG2, com destino à usina U2; CA2, CF2 e VR1, com destino à usina U3; FN1 e FL1, com destino à usina U4; e UB2 e AC2, com destino à usina U5.

Quanto à alocação das máquinas colhedoras nos canaviais, percebe-se que houve deslocamento de colhedora entre os canaviais AR1 e CN1, conforme Quadro 1D (Apêndice D). No Quadro 30, são listadas a colhedora que se deslocou, a alocação por turno de trabalho e a distância entre os canaviais.

Quadro 30 – Alocação por turno de trabalho, considerando o deslocamento da colhedora entre canaviais, assim como a distância entre os mesmos, pelo cenário 3 no primeiro dia de operação

Colhedora	Canavial	Turno de trabalho	Distância entre canaviais (km)
52	AR1 CN1	2, 3, 4 1	28,7

Para o segundo dia de operação, de acordo com o Quadro 2D (Apêndice D), propõe-se realizar a colheita em 8 canaviais: CN1 e PT2, com destino à usina U1; CF2, UD1 e VR1, com destino à usina U3; FN1 e FL1, com destino à usina U4; e AC2, com

destino à usina U5. Observa-se que neste dia não há direcionamento de cana para a usina U2.

Quanto ao deslocamento das máquinas, percebe-se que não houve deslocamento de colhedoras neste segundo dia, uma vez que cada grupo de colheita está disposta em somente um canavial, conforme Quadro 2D (Apêndice D).

Para o terceiro dia de operação, de acordo com o Quadro 3D (Apêndice D), propõe-se realizar a colheita em 9 canaviais: PT2, AG1 e MA1, com destino à usina U1; CF2, UD1, VR1 e VR2, com destino à usina U3; e FN1 e FL1, com destino à usina U4. Observa-se que neste dia não há direcionamento de cana para as usinas U2 e U5.

Quanto ao deslocamento das máquinas, percebe-se que não houve deslocamento de colhedoras neste terceiro dia, uma vez que cada grupo de colheita está disposta em somente um canavial, conforme Quadro 3D (Apêndice D).

Para o quarto dia de operação, de acordo com o Quadro 53, propõe-se realizar a colheita em 10 canaviais: MA1, TG1 e CN1, com destino à usina U1; PL1 (27%) e FL2, com destino à usina U2; CA1, PJ1, UD1 e VR2, com destino à usina U3; e FL1 e PL1 (73%), com destino à usina U4. Observa-se que não há direcionamento de cana para a usina U5 neste dia de operação.

Quanto à alocação das máquinas colhedoras nos canaviais, percebe-se que houve deslocamento de colhedoras entre os canaviais PL1 e PJ1, CA1 e PJ1, e PL1 e CA1, conforme Quadro 4D (Apêndice D). No Quadro 31, são listadas as colhedoras que se deslocaram, a alocação por turno de trabalho e a distância entre os canaviais.

Quadro 31 – Alocação por turno de trabalho, considerando o deslocamento da colhedora entre canaviais, assim como a distância entre os mesmos, pelo cenário 3 no quinto dia de operação

Colhedora	Canavial	Turno de trabalho	Distância entre canaviais (km)
5	CA1	1, 2, 4	18,6
	PJ1	3	
19	CA1	1, 2, 3	34,3
	PJ1	4	
11	PL1	1, 3	29,4
	CA1	4	
72	PL1	1	29,4
	CA1	2	
26	PL1	2	29,4
	PJ1	1	

Para o quinto dia de operação, de acordo com o Quadro 53, propõe-se realizar a colheita em 11 canaviais: MA1 e TG1, com destino à usina U1; PL1 (52%) e FL2, com destino à usina U2; CA1, CF1 e PJ1, com destino à usina U3; PL1 (48%) e FL1, com destino à usina U4; e CQ1, AC1 e UB1, com destino à usina U5.

Quanto à alocação das máquinas colhedoras nos canaviais, percebe-se que houve deslocamento de colhedora entre os canaviais UB1 e AC1, Quadro 5D (Apêndice D). No Quadro 32, são listadas a colhedora que se deslocou, a alocação por turno de trabalho e a distância entre os canaviais.

Quadro 32 – Alocação por turno de trabalho, considerando o deslocamento da colhedora entre canaviais, assim como a distância entre os mesmos, pelo cenário 3 no quinto dia de operação

Colhedora	Canavial	Turno de trabalho	Distância entre canaviais (km)
15	UB1 AC1	1 3, 4	32,3

Para o sexto dia de operação, de acordo com o Quadro 53, propõe-se realizar a colheita em 12 canaviais: MA1 e TG1, com destino à usina U1; PL1 (36%), PT1 (36%) e FL2, com destino à usina U2; CF1, PJ1 e PT1 (63%), com destino à usina U3; PL1 (63%) e FL1, com destino à usina U4; e UB1, CQ1, DE1 e AC1, com destino à usina U5.

Quanto à alocação das máquinas colhedoras nos canaviais, percebe-se que houve deslocamento de colhedoras entre os canaviais UB1 e DE1, conforme Quadro 6D (Apêndice D). No Quadro 33, são listadas as colhedoras que se deslocaram, a alocação por turno de trabalho e a distância entre os canaviais.

Quadro 33 – Alocação por turno de trabalho, considerando o deslocamento da colhedora entre canaviais, assim como a distância entre os mesmos, pelo cenário 3 no sexto dia de operação

Colhedora	Canavial	Turno de trabalho	Distância entre canaviais (km)
15	DE1 UB1	1, 2 3, 4	23, 3
54	DE1 UB1	4 1, 2, 3	

Para o sétimo dia de operação, de acordo com o Quadro 53, propõe-se realizar a colheita em 13 canaviais: MA1 e TG1, com destino à usina U1; PT1 (40%), FL2 e CG1,

com destino à usina U2; CF1, PJ1 e PT1 (40%), com destino à usina U3; PL1 e FL1, com destino à usina U4; e UB1, CQ1, DE1 e AC1, com destino à usina U5.

Quanto à alocação das máquinas colhedoras nos canaviais, percebe-se que houve deslocamento de colhedoras entre os canaviais UB1 e AC1, UB1 e DE1, e CQ1 e DE1, conforme Quadro 7D (Apêndice D). No Quadro 34, são listadas as colhedoras que se deslocaram, a alocação por turno de trabalho e a distância entre os canaviais.

Quadro 34 – Alocação por turno de trabalho, considerando o deslocamento da colhedora entre canaviais, assim como a distância entre os mesmos, pelo cenário 3 no sétimo dia de operação

Colhedora	Canavial	Turno de trabalho	Distância entre canaviais (km)
3	UB1	3	23,3
	DE1	1, 2, 4	
9	UB1	2, 3	
	DE1	1	
22	UB1	2, 3	
	DE1	1, 4	
15	UB1	2, 3	32,3
	AC1	1, 4	
27	UB1	1, 4	
	AC1	2, 3	
95	UB1	1, 2	
	AC1	3, 4	
97	UB1	3	
	AC1	1, 2, 4	
19	CQ1	1, 4	32
	DE1	2, 3	
26	CQ1	3	
	DE1	1, 2, 4	
28	CQ1	1	
	DE1	2, 3, 4	
92	CQ1	4	
	DE1	1, 2, 3	
101	CQ1	1	
	DE1	2, 3, 4	

Com relação às distâncias a serem percorridas pelas máquinas colhedoras de cana num mesmo dia de operação, constatou-se um valor nunca superior a 50 km (Quadros 30 a 34), limite estipulado pela Restrição 11 do modelo. Apesar de estar sendo considerada no modelo a distância entre os canaviais, ressalta-se que uma das pressuposições atribui o valor zero ao tempo de movimentação dos grupos de colheita entre os canaviais.

Além disso, vale mencionar que para cada colhedora em operação no campo adota-se como regra a utilização de, pelo menos, um caminhão canavieiro com dois conjuntos de semi-reboque (de 60 toneladas cada conjunto), para que haja descarregamento das colhedoras enquanto o caminhão esteja em trânsito.

Nos quadros a seguir, estão organizados, ao longo de uma semana pelo cenário 3: i) o volume de cana colhida e escoada por canavial (Quadro 35); ii) o volume de cana recebida por usina (Quadro 36); iii) os dados referentes aos valores diários e totais para o volume de cana transportado e os custos envolvidos (Quadro 37); e iv) a diferença de ATR por canavial selecionado ao longo da semana, em kg por tonelada de cana (Quadro 38).

Quadro 35 – Volume de cana colhida e escoada por canavial ao longo da semana, em toneladas, pelo cenário 3

Canavial	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Total na semana	Total na safra
PL1				668,9	8.640,0	8.640,0	8.640,0	26.588,90	637.705
FN1	8.640,0	8.640,0	1.474,1					18.754,10	449.795
AR1	7.747,7							7.747,70	185.820
CN1	1.411,2	2.503,6		4,6				3.919,40	94.008
CA1				2.428,5	3.510,4			5.938,90	142.443
CA2	5.938,9							5.938,90	142.443
UB1					169,9	2.160,0	4.500,0	6.829,90	163.807,5
UB2	6.829,9							6.829,90	163.807,5
CF1					5.831,2	7.715,3	4.215,5	17.762,00	426.006
CF2	8.640,0	8.640,0	482,2					17.762,20	426.006
PJ1				2.499,5	8.640,0	8.640,0	8.640,0	28.419,50	681.610
PT1						2.524,8	8.640,0	11.164,80	267.776
PT2	1.984,7	8.640,0	540,0					11.164,70	267.776
FL1	1.080,0	1.528,0	9.180,0	8.640,0	6.041,0	3.780,0	1.440,0	31.689,00	747.069
FL2				5.287,2	8.581,6	8.640,0	8.640,0	31.148,80	747.069
CG1							1.015,1	1.015,10	24.343
CG2	1.015,0							1.015,00	24.343
CQ1					1.446,7	8.640,0	5.220,0	15.306,70	367.115
UD1		2.086,6	8.640,0	8.280,0				19.006,60	455.853
MA1			175,6	8.640,0	8.640,0	2.880,0	2.503,6	22.839,20	547.778
TG1				224,8	2.503,6	8.263,6	8.640,0	19.632,00	470.859
AG1			3.015,8					3.015,80	72.331
VR1	3.402,6	7.255,0	1.487,7					12.145,30	291.297
VR2			7.371,8	4.773,7				12.145,50	291.297
DE1						1.041,5	6.120,0	7.161,50	171.760
AC1					628,0	8.640,0	6.300,0	15.568,00	373.382
AC2	8.640,0	6.928,0						15.568,00	373.382
							TOTAL	376.077,40	9.006.881,00

A quantidade total de cana colhida e transportada por canavial ao longo da semana (Quadro 35) corresponde a cerca de 4,2% da quantidade individual disponível durante toda a safra, conforme definido numa das restrições do modelo computacional (Restrição 5). Percebe-se que, ao longo da semana, houve colheita nos 27 canaviais inseridos no modelo.

Quadro 36 – Volume de cana recebida por usina ao longo da semana, em toneladas, pelo cenário 3, assim como a quantidade máxima permitida

	U1	U2	U3	U4	U5
Dia 1	11.143,6	1.015,0	17.981,5	9.720,0	15.469,9
Dia 2	11.143,6	0,0	17.981,6	10.168,0	6.928,0
Dia 3	3.731,4	0,0	17.981,7	10.654,1	0,0
Dia 4	8.869,4	5.467,2	17.981,7	9.128,9	0,0
Dia 5	11.143,6	13.168,8	17.981,6	10.093,8	2.244,6
Dia 6	11.143,6	12.713,6	17.981,6	9.244,9	20.481,5
Dia 7	11.143,6	13.169,1	17.981,5	10.080,0	22.140,0
Média	9.759,83	6.504,81	17.981,60	9.869,96	9.609,14
Máximo/usina/dia	11.143,77	3.168,88	17.981,74	10.167,84	25.430,36
Variação (%)	-12%	-51%	0%	-3%	-62%

Pelo Quadro 36, constata-se que, em média, a utilização da capacidade das usinas corresponde a 88%, 49%, 100%, 97% e 38% para as usinas U1, U2, U3, U4 e U5, respectivamente. Os valores baixos para as usinas U2 e U5 são explicados pelo fato do modelo limitar somente a quantidade máxima a ser recebida pelas usinas (Restrição 1), e não a mínima, ocasionando o não direcionamento de cana para a U2, nos dias 2 e 3, e para a U5, nos dias 3 e 4.

Quadro 37 – Volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade, custo total e custo por tonelada transportada no trecho canavial-usina pelo cenário 3 ao longo de uma semana

	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo por tonelada (R\$)
Dia 1	55.330,00	611.179,30	34,60	611.213,90	11,05
Dia 2	46.221,20	485.145,00	4.124,00	489.269,00	10,59
Dia 3	32.367,20	437.045,70	4.037,90	441.083,60	13,63
Dia 4	41.447,20	466.920,80	9.861,60	476.782,40	11,50
Dia 5	54.632,40	518.010,10	9.459,80	527.469,90	9,65
Dia 6	71.565,20	648.268,80	6.394,40	654.663,20	9,15
Dia 7	74.514,20	664.664,70	0,0	664.664,70	8,92
TOTAL	376.077,40	3.831.234,40	33.912,30	3.865.146,70	10,28

Comparando os cenários 1, 2 e 3, tem-se praticamente os mesmos valores para o custo da tonelada de cana transportada, equivalendo respectivamente a R\$ 10,28/t (Quadro 28), R\$ 10,27/t (Quadro 29) e R\$ 10,28/t (Quadro 37). Como na solução foi apontada somente a utilização da modalidade rodoviária para o escoamento da cana nestes três cenários, a diferença a menor (R\$ 0,01/t), constatada para o custo da tonelada no cenário 2, ocorreu em virtude dos valores atribuídos pelo modelo ao gap da solução, os quais variaram de 0,01% a 0,13%.

Observando-se ainda os Quadros 28, 29 e 37, os melhores momentos para a colheita são nos últimos dias da semana, em função dos menores valores do custo por tonelada de cana transportada.

Quanto ao custo de penalidade, percebe-se que há um crescimento do dia 1 ao dia 4, e uma redução do dia 5 ao dia 7, independente do volume de cana colhido em cada dia (Quadro 37). Isso quer dizer que as colheitas realizadas no início e no final da semana, cujos valores da diferença de ATR se aproximam de zero (Quadro 38), ocorrem em momento mais adequado do ponto de vista da concentração de açúcar recuperável presente na matéria-prima.

A explicação para tal comportamento se deve ao fato dos valores de ATR inseridos no modelo computacional para o cenário 1 considerarem, de forma aleatória, os dias 1 e 7 como pontos extremos para tais valores, os quais ora são representados por valores mínimos e ora por valores máximos, em kg de ATR por tonelada de cana.

Quadro 38 – Diferença de ATR por canavial selecionado ao longo da semana, em quilo de açúcar por tonelada de cana, pelo cenário 3

Canavial	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
PL1				1,10	0,73	0,37	0,00
FN1	0,00	0,10	0,20				
AR1	0,00						
CN1	0,00	0,16		0,48			
CA1				0,04	0,02		
CA2	0,00						
UB1					0,39	0,19	0,00
UB2	0,00						
CF1					0,09	0,05	0,00
CF2	0,00	0,43	0,87				
PJ1				1,21	0,80	0,40	0,00
PT1						0,52	0,00
PT2	0,00	0,11	0,21				
FL1	0,07	0,06	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00
FL2				0,37	0,24	0,12	0,00
CG1							0,00
CG2	0,00						
CQ1					0,20	0,10	0,00
UD1		0,20	0,41	0,61			
MA1			1,20	0,90	0,60	0,30	0,00
TG1				1,22	0,82	0,41	0,00
AG1			0,07				
VR1	0,00	0,24	0,47				
VR2			0,39	0,58			
DE1						0,31	0,00
AC1					0,23	0,11	0,00
AC2	0,00	0,12					

Com o intuito de validar o modelo matemático para a alternativa de transporte ferroviário em complementação ao rodoviário, um quarto cenário foi analisado, considerando-se as mesmas suposições do cenário 3, com exceção dos custos ferroviários, os quais foram reduzidos em 50% dos valores originais. Na realidade, esta redução de 50% foi obtida por tentativa e erro, sendo primeiro analisado 10% de redução, depois 20%, e assim por diante, até ser obtida uma solução de transporte rodoviário para o escoamento da cana-de-açúcar em pelo menos um trajeto canavial-usina.

7.5 Cenário 4

O cenário 4 levou em consideração as mesmas suposições do cenário 3, com exceção dos custos ferroviários, os quais foram reduzidos em 50% dos valores originais. As matrizes dos custos ferroviários e rodoviários adotadas como entradas no modelo são apresentadas, respectivamente, nos Quadro 39 e 40.

Quadro 39 – Custos ferroviários, entre a origem i e o destino j, em reais por tonelada transportada, considerando redução de 50% no valor do frete praticado e inclusão no modelo dos terminais EFAP, EFFA, EFCF, EFFB e EFDE (cenário 4)

	EFAP =U1	EFFA =U2	EFCF =U3	EFFB =U4	EFDE =U5	EFBA	EFAr	EFUd	EFUb
EFBA	17,22	27,19	23,35	28,71	20,71	0,00	10,22	12,44	18,56
EFAr	16,72	26,70	22,86	28,21	20,22	10,22	0,00	11,95	18,07
EFUd	18,95	24,47	20,63	25,99	18,00	12,44	11,95	0,00	15,85
EFUb	25,07	18,35	14,51	19,87	11,87	18,56	18,07	15,85	0,00
EFAP	0,00	22,94	26,78	21,43	27,22	17,22	16,72	18,95	25,07
EFFA	22,94	0,00	13,56	11,24	20,50	27,19	26,70	24,47	18,35
EFCF	26,78	13,56	0,00	15,08	16,66	23,35	22,86	20,63	14,51
EFFB	21,43	11,24	15,08	0,00	22,01	28,71	28,21	25,99	19,87
EFDE	27,22	20,50	16,66	22,01	0,00	20,71	20,22	18,00	11,87

Quadro 40 – Custos rodoviários, entre a origem i e o destino j, em reais por tonelada transportada, considerando a inclusão no modelo dos terminais EFAP, EFAA, EFCF, EFFB e EFDE

	EFAP =U1	EFAA =U2	EFCF =U3	EFFB =U4	EFDE =U5	EFBA	EFAr	EFUd	EFUb
PL1	45,62	14,63	14,63	14,63	23,24	41,32	42,18	35,29	18,94
FN1	43,90	12,05	24,10	9,47	38,73	46,48	48,20	41,32	34,43
AR1	4,31	32,71	30,99	37,87	49,92	31,85	25,82	25,82	44,76
CN1	6,03	33,57	30,99	37,87	50,78	31,85	27,55	26,68	44,76
CA1	40,46	18,94	12,05	18,94	20,66	38,73	40,46	33,57	16,36
CA2	47,34	25,82	18,08	25,82	21,52	38,73	39,60	32,71	15,50
UB1	52,51	34,43	23,24	35,29	7,75	34,43	35,29	28,41	10,33
UB2	39,60	39,60	27,55	40,46	20,66	21,52	22,38	15,50	15,50
CF1	28,41	11,19	6,89	15,50	25,82	30,99	32,71	25,82	20,66
CF2	35,29	18,08	6,03	22,38	21,52	37,87	39,60	33,57	17,22
PJ1	35,29	18,08	6,03	14,63	22,38	38,73	39,60	34,43	17,22
PT1	27,55	11,19	9,47	16,36	28,41	30,13	31,85	24,96	23,24
PT2	16,36	20,66	18,94	25,82	37,87	28,41	30,13	23,24	32,71
FL1	43,04	11,19	23,24	6,89	37,87	45,62	47,34	40,46	33,57
FL2	33,57	3,45	14,63	7,75	33,57	37,01	37,87	31,85	28,41
CG1	37,87	12,05	18,08	16,36	37,01	40,46	42,18	35,29	32,71
CG2	31,85	6,03	12,91	11,19	31,85	35,29	36,15	30,13	26,68
CQ1	55,09	37,87	25,82	38,73	7,75	37,01	37,87	30,99	13,77
UD1	33,57	28,41	15,50	32,71	25,82	18,08	19,80	12,91	20,66
MA1	15,50	27,55	27,55	32,71	44,76	25,82	27,55	21,52	39,60
TG1	12,91	37,87	37,87	42,18	43,04	17,22	15,50	18,94	37,01
AG1	28,41	39,60	39,60	44,76	33,57	6,89	7,75	10,33	27,55
VR1	38,73	19,80	8,61	20,66	17,22	34,43	36,15	28,41	12,05
VR2	35,29	24,10	14,63	28,41	21,52	23,24	24,96	18,08	15,50
DE1	48,20	33,57	20,66	33,57	3,45	31,85	32,71	25,82	7,75
AC1	52,51	28,41	24,96	28,41	11,19	35,29	37,01	30,13	12,91
AC2	47,34	24,96	19,80	24,96	12,91	30,13	31,85	24,10	7,75

Neste cenário, foi indicada como solução, para a semana de número 10 (colheita em momento intermediária da safra), a utilização do modal rodo-ferroviário em um dia de operação (dia 3), sendo a cana colhida nos outros seis dias escoada pelo modal rodoviário.

A programação dos grupos de colheita nos canaviais em cada dia da semana do cenário 4, assim como os modais de transporte adotados, a usina de destino e os custos envolvidos estão apresentados no Apêndice E.

Conforme pode ser visualizado no Quadro 3E (Apêndice E), o terceiro dia de operação é o único momento em que ocorre o transporte rodo-ferroviário, quando 3.015,8 toneladas de cana são movimentadas do canavial AG1 ao terminal ferroviário

EFBA, sendo posteriormente deslocadas ao terminal ferroviário EFAP, situado na usina U1. Nota-se que a distância entre o canal AG1 e a usina U1 corresponde a 150 km, a maior quilometragem identificada no Quadro 8D (Apêndice D) entre os trechos canal-usina, corroborando as afirmações na literatura sobre a não utilização do transporte ferroviário para pequenas distâncias.

A utilização da capacidade dos terminais ferroviários no cenário 4 está descrita no Quadro 41. Constata-se que somente os terminais EFBA e EFAP foram escolhidos pelo modelo para o transbordo da cana-de-açúcar, mesmo assim com uma utilização baixa de 13% da capacidade no terceiro dia e operação.

Quadro 41 – Volume de cana recebida por terminal ferroviário ao longo da semana, em toneladas, pelo cenário 4, assim como a quantidade máxima permitida

	Capacidade de transbordo da cana (t/dia)	Parcela utilizada (t/dia)
EFBA	24.000,00	3.015,8 (dia 3)
EFAr	24.000,00	-
EFUd	24.000,00	-
EFUb	24.000,00	-
EFAP	24.000,00	3.015,8 (dia 3)
EFFB	24.000,00	-
EFFA	24.000,00	-
EFCF	24.000,00	-
EFDE	24.000,00	-

Quando se compara os resultados dos cenários 3 e 4, referentes especificamente à colheita no canal AG1 (Quadros 42 e 43), tem-se custos totais menores (redução de 15%) para o cenário 4.

Quadro 42 – Modal utilizado, volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade e custo total no trecho AG1-U1 pelo cenário 3 no terceiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo total (R\$)
AG1-U1	Rodovia	3.015,8	85.679,3	92,0	85.771,3

Quadro 43 – Modal utilizado, volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade e custo total no trecho AG1-U1 pelo cenário 4 no terceiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo total (R\$)
AG1-EFBA	Rodovia	3.015,8	20.779,0	92,0	20.871,0
EFBA-EFAP	Ferrovias	3.015,8	51.932,3	-	51.932,3
TOTAL					72.803,3

No Quadro 44, estão tabulados os dados referentes aos valores diários e totais para o volume de cana transportado no decorrer de uma semana no cenário 4, assim como os custos envolvidos.

Quadro 44 – Volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade, custo total e custo por tonelada transportada no trecho canavial-usina pelo cenário 4 ao longo de uma semana

	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo por tonelada (R\$)
Dia 1	54.250,10	603.690,50	0,00	603.690,50	11,13
Dia 2	45.405,30	476.891,30	4.094,10	480.985,40	10,59
Dia 3	34.046,60	433.552,80	4.378,30	437.931,10	12,86
Dia 4	42.351,50	465.718,70	11.500,10	477.218,80	11,27
Dia 5	54.621,90	525.577,90	9.508,90	535.086,80	9,80
Dia 6	68.640,10	625.948,00	5.847,50	631.795,50	9,20
Dia 7	76.222,10	678.052,70	0,0	678.052,70	8,90
TOTAL	375.537,60	3.809.431,90	35.328,90	3.844.760,80	10,24

Analisando os cenários 1, 2, 3 e 4, tem-se valores praticamente similares para o custo da tonelada de cana transportada, conforme é mostrado no Quadro 45 a seguir.

Quadro 45 – Semana analisada para colheita, terminais ferroviários, percentual dos custos ferroviários, volume e custos envolvidos no escoamento da cana nos cenários 1, 2, 3, e 4 ao longo de uma semana

	Semana de colheita	Terminais ferroviários	Custos ferroviários	Volume (t)	Custo total (R\$)	Custo unitário (R\$/t)
Cenário 1	Semana 10	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb	Originais	375.538,40	3.861.010,30	10,28
Cenário 2	Semana 10	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFFL	Originais	375.537,50	3.857.102,90	10,27
Cenário 3	Semana 10	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCE, EFDE	Originais	376.077,40	3.865.146,70	10,28
Cenário 4	Semana 10	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCE, EFDE	50% dos custos originais	375.537,60	3.844.760,80	10,24

Apesar do cenário 4 possuir o menor custo unitário da tonelada da cana movimentada ao longo da safra, ressalta-se que tal custo, além de não ser significativamente menor do que os valores apresentados pelos cenários 1, 2 e 3 (redução de apenas 0,4%), ele foi calculado considerando-se uma redução de 50% nos custos ferroviários levantados na coleta de dados.

De modo a verificar se valores ainda menores para os custos ferroviários aplicados atualmente contribuiriam para a utilização de outros terminais ferroviários, já que dos nove terminais em análise, apenas para dois houve alocação de transbordo quando esse custo foi reduzido em 50%, o modelo foi executado também para uma redução de 80%, cuja solução é apresentada no Quadro 46 a seguir.

Quadro 46 – Volume de cana recebida por terminal ferroviário ao longo da semana, em toneladas, considerando uma redução de 80% dos custos ferroviários, assim como a quantidade máxima permitida

	Capacidade de transbordo da cana (t/dia)	Utilização com redução de 80% (t/dia)
EFBA	24.000,00	135,80 (dia 2) 2.880,00 (dia 3)
EFAr	24.000,00	-
EFUd	24.000,00	-
EFUb	24.000,00	15.520,90 (dia 1) 7.108,00 (dia 2)
EFAP	24.000,00	135,80 (dia 2) 2.880,00 (dia 3)
EFFB	24.000,00	-
EFFA	24.000,00	-
EFCE	24.000,00	-
EFDE	24.000,00	15.520,90 (dia 1) 7.108,00 (dia 2)

De acordo com o Quadro, constata-se que, para a redução de 80% dos custos ferroviários, quatro terminais são escolhidos para o transbordo da cana: EFUb e EFDE, com utilização de 65% da capacidade no dia 1 e 30% da capacidade no dia 2; e EFBA e EFAP, com utilização menor de 0,6% da capacidade no dia 2 e 12% da capacidade no dia 3.

Analisando agora a origem da cana-de-açúcar que é transportada por rodovia, tem-se as seguintes indicações:

- Dia 1: 231,0, 6.829,9 e 8.460,0 toneladas de cana são movimentadas respectivamente dos canaviais CA2, UB2 e AC2 ao terminal ferroviário EFUb, sendo

posteriormente deslocadas ao terminal ferroviário EFDE, situado na usina U5 (Figura 12);



Figura 12 – Representação gráfica do resultado para redução de 80% nos fretes ferroviários para o primeiro dia de operação.

- Dia 2: 7.108,0 toneladas de cana são movimentadas do canal AC2 ao terminal ferroviário EFUb, sendo posteriormente deslocadas ao terminal ferroviário EFDE, situado na usina U5; e 135,8 toneladas de cana são movimentadas do canal AG1 ao terminal ferroviário EFBA, sendo posteriormente deslocadas ao terminal ferroviário EFAP, situado na usina U1 (Figura 13);



Figura 13 – Representação gráfica do resultado para redução de 80% nos fretes ferroviários para o segundo dia de operação.

- Dia 3: 2.880,0 toneladas de cana são movimentadas do canal AG1 ao terminal ferroviário EFBA, sendo posteriormente deslocadas ao terminal ferroviário EFAP, situado na usina U1 (Figura 14).



Figura 14 – Representação gráfica do resultado para redução de 80% nos fretes ferroviários para o terceiro dia de operação.

Pelas Figuras 12, 13 e 14, observa-se que a proposição de implantação de cinco terminais ferroviários, um terminal em cada usina, e de uma malha ferroviária ligando estes cinco terminais, conforme ilustrado na Figura 10, é desnecessária, uma vez que somente uma parte da malha simulada é utilizada. Nestas análises há, inclusive, utilização de terminais ferroviários já existentes na região: EFUb, nos dias 1 e 2, e EFBA, nos dias 2 e 3, o que contribui para economias de escala no transporte ferroviário da região.

Comparando os resultados da redução de 50% dos custos ferroviários com a redução de 80%, verifica-se que, enquanto naquele apenas o canal AG1 escoava cana pelos modais rodoviário e ferroviário no decorrer de uma semana, nesse tem-se escoamento por quatro canaviais – CA2, UB2, AC2 e AG1, cujas distâncias e custos de transporte às respectivas usinas para processamento encontram-se tabuladas no Quadros 47 e 48 a seguir.

Quadro 47 – Distâncias rodoviárias e rodo-ferroviárias entre o trecho canavial-usina indicado como solução, considerando uma redução de 80% do frete ferroviário

Canavial	Usina	Distância rodoviária (km)	Distância rodo+ferroviária (km)
CA2	U5	106	74,7 + 45,3
UB2	U5	104	72,3 + 45,3
AC2	U5	55,5	28,2 + 45,3
AG1	U1	150	20,5 + 157,9

Quadro 48 – Custos rodoviários e rodo-ferroviários entre o trecho canavial-usina indicado como solução, considerando uma redução de 80% do frete ferroviário

Canavial	Usina	Custo rodoviário (R\$/t)	Custo rodo+ferroviário (R\$/t)
CA2	U5	21,52	15,50 + 11,87 = 27,37
UB2	U5	20,66	15,50 + 11,87 = 27,37
AC2	U5	12,91	7,75 + 11,87 = 19,62
AG1	U1	28,41	6,89 + 17,22 = 24,11

Apesar do Quadro 47 apresentar solução rodo-ferroviário para trechos rodoviários menores que 150 km, vale ressaltar que tal solução somente foi possível após a redução drástica dos fretes ferroviários. Pelo Quadro 48, onde aparece o cálculo dos respectivos custos de transporte rodoviário e rodo-ferroviário, observa-se custos rodoviários maiores para o trajeto AG1-U1, e custos rodoviários menores para os trajetos CA1-U5, UB2-U5 e AC2-U5. Contudo, mesmo sendo estimados custos rodoviários menores para estes trajetos, o modelo apresenta como solução a alternativa o modal rodo-ferroviário, o que pode ser explicado pelo fato da função objetivo não considerar apenas a minimização dos custos de transporte, e sim do somatório dos custos de transporte com os custos de penalidade da colheita da cana não madura.

Quanto ao custo da tonelada de cana transportada no decorrer de uma semana, quando os custos ferroviários são reduzidos em 80%, tem-se o valor de R\$10,04, contra R\$10,24 por tonelada transportada com a redução de 50%, equivalendo a uma queda de apenas 2%.

Estes resultados demonstram um aumento significativo na utilização dos terminais ferroviários e no número de canaviais que destinam cana por rodo-ferrovia, quando se considera uma redução de 80% dos custos originais adotados pelo modal ferroviário, ao invés da redução de 50%. Saliencia-se, contudo, que tais fretes praticados pelo setor ferroviário, apesar de serem implementados por países com práticas mais eficientes em logística, é uma realidade muito distante do atual cenário brasileiro.

Partindo do pressuposto que um empreendimento deve apresentar rentabilidade financeira atrativa e viável, conclui-se que os resultados do cenário 4, tanto para a redução de 50% quanto de 80% nos custos ferroviários praticados, não são suficientes para justificar uma política no país de redução desses custos, nem tampouco a implementação de terminais ferroviários nos municípios de Araporã (EFAP em U1), Frutal (EFFA em U2, e EFFB em U4), Campo Florido (EFCF em U3), e Delta (EFDE em U5), com a conseqüente construção de malha ferroviária interligando estes municípios.

Além dos quatro cenários descritos (Quadro 45), outros três foram ainda avaliados, os quais se apresentam como variantes desse quarto cenário. A finalidade da análise dessas variantes foi para verificar como a semana escolhida (início, meio ou final da safra) para inserção dos dados no modelo impacta no custo unitário da cana-de-açúcar transportada.

7.6 Cenários 5, 6 e 7

Os cenários 5, 6 e 7 levaram em consideração as mesmas suposições do cenário 4, porém com diferenças quanto à semana selecionada para análise: i) semana de número 1 (colheita em momento inicial da safra), para o cenário 5; ii) semana de número 34 (colheita em momento final da safra), para o cenário 6; e iii) semana de número 10 com variação superestimada para o rendimento de ATR, para o cenário 7.

A programação dos grupos de colheita nos canaviais em cada dia da semana dos cenários 5, 6 e 7, assim como os modais de transporte adotados, a usina de destino e os respectivos custos envolvidos estão apresentados no Apêndice F, G e H, respectivamente.

Para todos os três cenários, foi indicada como solução a utilização do modal rodo-ferroviário em apenas um dia de operação, na movimentação do canavial AG1 ao terminal ferroviário EFBA, sendo posteriormente deslocadas ao terminal ferroviário EFAP, situado na usina U1, assim como aconteceu no cenário 4. Nos demais dias da semana, o escoamento da cana se deu pelo transporte rodoviário.

Nos Quadros 49, 50 e 51, tem-se os resultados referentes à colheita no canavial AG1 nos cenários 5, 6 e 7, respectivamente.

Quadro 49 – Modal utilizado, volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade e custo total no trecho AG1-U1 pelo cenário 5 no quarto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo total (R\$)
AG1-EFBA	Rodovia	2.135,9	14.716,6	1.171,9	15.888,50
EFBA-EFAP	Ferrovias	2.135,9	36.780,9	-	36.780,90
TOTAL					52.669,40

Quadro 50 – Modal utilizado, volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade e custo total no trecho AG1-U1 pelo cenário 6 no terceiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo total (R\$)
AG1-EFBA	Rodovia	191,1	1.317,0	4,4	1.321,40
EFBA-EFAP	Ferrovias	191,1	3.291,6	-	3.291,60
TOTAL					4.613,00

Quadro 51 – Modal utilizado, volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade e custo total no trecho AG1-U1 pelo cenário 7 no segundo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo total (R\$)
AG1-EFBA	Rodovia	3.015,8	20.779,0	1.162,8	21.941,80
EFBA-EFAP	Ferrovias	3.015,8	51.932,3	-	51.932,30
TOTAL					73.874,10

Os dados referentes aos valores diários e totais para o volume de cana transportado, assim como os custos envolvidos, no decorrer de uma semana, nos cenários 5, 6 e 7, respectivamente, encontram-se dispostos nos Quadros 52, 53, e 54.

Quadro 52 – Volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade, custo total e custo por tonelada transportada no trecho canavial-usina pelo cenário 5 ao longo de uma semana

	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo por tonelada (R\$)
Dia 1	28.385,60	403.633,80	0,00	403.633,80	14,22
Dia 2	13.529,60	194.187,60	521,40	194.709,00	14,39
Dia 3	24.947,70	271.574,80	8.661,70	280.236,50	11,23
Dia 4	34.571,30	339.068,10	17.123,00	356.191,10	10,30
Dia 5	45.453,60	410.674,40	21.144,80	431.819,20	9,50
Dia 6	58.035,60	397.914,40	13.480,80	411.395,20	7,09
Dia 7	70.770,10	664.891,90	0,0	664.891,90	9,40
TOTAL	275.693,50	2.681.945,00	60.931,70	2.742.876,70	9,95

Quadro 53 – Volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade, custo total e custo por tonelada transportada no trecho canavial-usina pelo cenário 6 ao longo de uma semana

	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo por tonelada (R\$)
Dia 1	55.977,60	518.986,00	0,00	518.986,00	9,27
Dia 2	20.875,90	226.764,10	293,30	227.057,40	10,88
Dia 3	5.202,7	72.295,80	85,40	72.381,20	13,91
Dia 4	1.655,80	25.526,30	12,80	25.539,10	15,42
Dia 5	1.080,00	15.800,40	0,00	15.800,40	14,63
Dia 6	900,00	13.167,00	0,00	13.167,00	14,63
Dia 7	5.892,40	49.172,10	0,00	49.172,10	8,35
TOTAL	91.584,40	921.711,70	391,50	922.103,20	10,07

Quadro 54 – Volume de cana transportado, custo de transporte, custo de penalidade, custo total e custo por tonelada transportada no trecho canavial-usina pelo cenário 7 ao longo de uma semana

	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo por tonelada (R\$)
Dia 1	65.142,40	531.220,20	0,00	531.220,20	8,15
Dia 2	38.994,50	437.873,30	34.920,20	472.793,50	12,12
Dia 3	32.305,90	347.848,10	19.158,30	367.006,40	11,36
Dia 4	45.283,10	440.735,60	41.621,70	482.357,30	10,65
Dia 5	54.258,10	536.777,20	48.358,40	585.135,60	10,78
Dia 6	66.391,60	685.026,10	25.941,00	710.967,10	10,71
Dia 7	73.162,00	829.951,50	0,00	829.951,50	11,34
TOTAL	375.537,60	3.809.432,00	169.999,60	3.979.431,60	10,60

Analisando os cenários 4, 5, 6 e 7, tem-se valores diferentes para o custo da tonelada de cana transportada, conforme é mostrado no Quadro 55 a seguir.

Quadro 55 – Semana analisada para colheita, terminais ferroviários, percentual dos custos ferroviários, volume e custos envolvidos no escoamento da cana nos cenários 4, 5, 6 e 7 ao longo de uma semana

	Semana de colheita	Terminais ferroviários	Custos ferroviários	Volume (t)	Custo total (R\$)	Custo unitário (R\$/t)
Cenário 4	Semana 10	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCE, EFDE	50% dos custos originais	375.537,60	3.844.760,80	10,24
Cenário 5	Semana 1	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCE, EFDE	50% dos custos originais	275.693,50	2.742.876,70	9,85
Cenário 6	Semana 34	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCE, EFDE	50% dos custos originais	91.584,40	922.103,20	10,07
Cenário 7	Semana 10, com alta variação de ATR	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCE, EFDE	50% dos custos originais	375.537,60	3.979.431,60	10,60

De acordo com o Quadro 55, percebe-se uma redução de 2,8% e de 1,7% no custo da tonelada da cana escoada no decorrer de uma semana nos cenários 5 e 6, respectivamente, quando comparados aos valores apresentados pelo cenário 4, e um aumento de 3,5% no custo apresentado pelo cenário 7, quando também comparado ao cenário 4. A partir destes resultados, conclui-se não haver diferenças significativas relacionadas ao custo unitário da tonelada da cana movimentada ao longo da safra, independente da semana selecionada para análise, no caso dos cenários 5 e 6, e do valor do rendimento de ATR, caso do cenário 7.

7.7 Discussão geral dos cenários

Visando uma melhor compreensão das análises realizadas, são mostrados no Quadro 56 a seguir os resultados de cada cenário, juntamente com as características individuais dos mesmos, as quais já foram descritas no Quadro 27.

Quadro 56 – Resumo das particularidades e resultado de cada cenário analisado

Cenário	Terminais ferroviários	Capacidade de transbordo da cana (t/dia)	Custos ferroviários	Semana de colheita	Custo da tonelada de cana escoada
1	EFBA EFAr EFUd EFUb	23.500,00 144,21 3.125,00 6.055,00	Originais	Semana 10	R\$ 10,28
2	EFBA EFAr EFUd EFUb EFFL	23.500,00 144,21 3.125,00 6.055,00 24.000,00	Originais	Semana 10	R\$ 10,27
3	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	Originais	Semana 10	R\$ 10,28
4	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	50% dos Custos Originais	Semana 10	R\$ 10,24
5	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	50% dos Custos Originais	Semana 1	R\$ 9,85
6	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	50% dos Custos Originais	Semana 34	R\$ 10,07
7	EFBA, EFAr, EFUd, EFUb, EFAP, EFFB, EFFA, EFCF, EFDE	24.000,00*	50% dos Custos Originais	Semana 10, com alta variação de ATR	R\$ 10,60

* Capacidade para cada estação

De modo geral, a avaliação de todos os cenários foi baseada na premissa de que qualquer grupo de colheita poderia ser usado no corte e carregamento da cana, sendo a mesma direcionada à qualquer unidade de processamento, independente do contrato firmado entre produtor rural e usina. Além disso, os pontos de origem da cana foram concentrados em um ou dois aglomerados por município, sendo objeto de estudo 19

municípios do Triângulo Mineiro. Com relação às usinas, a amostra analisada foi composta de 5 usinas existentes também nessa região.

O estudo de programação do grupo de corte, para definição das colhedoras a serem usadas por turno nos canaviais, mostrou ser necessária a consideração no modelo de 110 máquinas colhedoras, valor total disponível pelas cinco usinas estudadas. Apesar da existência de restrições que limitassem o deslocamento dos grupos de colheita em função da distância entre os canaviais, considerando a movimentação num mesmo dia de operação e a movimentação de um dia de trabalho para o outro, verificou-se que a ausência de uma restrição que representasse o tempo percorrido nestes deslocamentos obriga ao tomador de decisão a considerar esta variável na análise para posterior implementação da solução apresentada.

Para a programação do transporte a ser adotado no escoamento da matéria-prima (modalidade rodoviária ou rodo-ferroviária) ao longo de sete dias de operação, em cada turno de trabalho, os resultados mostraram ser o transporte rodoviário o mais indicado para todos, ou quase todos, os dias analisados em cada cenário. Tal fato pode ser explicado em virtude principalmente dos baixos valores do frete rodoviário, quando comparados ao ferroviário.

Nas situações em que ocorreu aumento de terminais ferroviários, e conseqüentemente da malha ferroviária existente na região, adotados simultaneamente à redução considerável do frete ferroviário praticado pelas concessionárias, verificou-se como solução ótima a utilização rodo-ferroviária para o escoamento da cana oriunda de alguns canaviais, em alguns dias da semana. Quanto ao custo unitário da tonelada da cana movimentada ao longo da semana, nestas situações específicas, o percentual de redução foi muito pequeno (Quadro 56), não justificando alterações no sistema de transporte atual.

Para o tempo de resolução do modelo computacional, constatou-se um máximo de duas horas e quinze minutos de processamento, apresentando os valores de 60; 21; 135,6; 30,6; 19,2; 0,9; e 15,6 minutos, respectivamente para os cenários 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Em função dos experimentos realizados e da complexidade do modelo, foi necessária a limitação do gap da solução em 1%, de modo a viabilizar a resolução dos cenários. Apesar de não terem sido encontradas soluções ótimas, já que o gap não foi igual a zero em nenhum cenário, as soluções foram todas factíveis, com o gap variando entre 0,01% e 0,46%.

Por fim, comparando o modelo matemático apresentado por Milan et al. (2006) ao modelo que foi proposto no presente estudo, constatam-se diferenças marcantes no

que diz respeito ao tratamento das variáveis “qualidade da matéria-prima” e “período de planejamento da safra”.

Naquele trabalho, a função objetivo (minimização) foi representada por apenas um fator, cuja variação se dava em função, diretamente, dos custos de transporte unitários, das distâncias percorridas e do volume de cana movimentado entre cada origem-destino, e de um coeficiente de oportunidade, representando a preferência por cortar a cana-de-açúcar em cada canavial. Quanto maior o grau de maturação da cana naquele canavial (cana de melhor qualidade), menor seria o valor atribuído ao coeficiente de oportunidade, o qual variava de 0 a 1. Este planejamento se deu exclusivamente para um dia de operação da atividade colheita da cana, seguida do transporte.

Já no modelo proposto no tópico 6.1, considerou-se como objetivo a minimização do somatório de dois fatores, representados diretamente pelos: i) custos de transporte unitários, distâncias percorridas e volume de cana movimentado entre cada origem-destino; e ii) preço do ATR pago ao produtor, valor da diferença do rendimento de ATR, quando comparado à concentração de açúcares que poderiam estar presentes caso a colheita acontecesse no período de pico máximo (dentro da semana), e volume de cana movimentado entre cada origem-destino. Neste caso também, quanto maior for o grau de maturação da cana naquele canavial, ou seja, quanto menor for a diferença do rendimento de ATR, menor será o valor retornado para a função objetivo.

Ressalta-se que no processo de formulação deste modelo matemático, a ideia foi tratar a variável “qualidade da matéria-prima” de forma que a função objetivo apresentasse resultados condizentes com as situações reais de planejamento da colheita por parte das usinas. Quanto ao período de análise do modelo, o mesmo pretendeu retornos semanais, auxiliando o tomador de decisão no planejamento semanal da colheita e transporte da cana, e não somente um planejamento diário, como em Milan et al. (2006).

Na realidade, a determinação de planejamento semanal no presente modelo, e não um horizonte de tempo maior, ocorreu em virtude da sua alta complexidade computacional, justificada pelo grande número de variáveis existentes, principalmente as de natureza binária. A modelagem realizada, conforme pode ser constatado na função objetivo proposta, considera um p (período da safra) variando de 1 até P , podendo ser P um número inteiro qualquer. Neste caso específico, o P correspondeu ao número 7, representando os dias de uma semana.

Apesar de se constatar a inclusão de variáveis importantes ao planejamento da colheita nos canaviais no modelo proposto que foi adaptado de Milan et al. (2006), vale ressaltar que variáveis relacionadas à capacidade, velocidade e tempo de espera do caminhão de transporte nos canaviais não foram abordadas no presente estudo.

8. CONCLUSÃO

Com o intuito de se analisar o potencial de inserção de novos modais de transporte na movimentação da cana-de-açúcar, e por ser a mesorregião do Triângulo Mineiro, no estado de Minas Gerais, apontada como alvo de novos investimentos por parte de grupos econômicos de outras áreas do país e do exterior, o presente trabalho analisou a utilização do modal ferroviário em complementação ao modal rodoviário existente nessa região, de modo que os custos de transporte sejam minimizados e a qualidade da matéria-prima seja maximizada.

Esta avaliação se deu a partir do desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira mista, cuja função objetivo se caracterizou pela minimização do somatório dos custos de transporte, relacionados à movimentação de cana-de-açúcar dos canaviais às usinas, aos custos de penalização pela colheita da cana-de-açúcar realizada em momento diferente do ideal, no que diz respeito ao índice ótimo de maturação.

Para a valiação do modelo, sete cenários foram analisados, os quais se diferenciaram quanto ao número de terminais ferroviários que podem ser utilizados no descarregamento e transbordo rodo-ferroviário, assim como as respectivas capacidades de carga, ao valor do frete ferroviário praticado e à semana selecionada para a colheita da safra. O modelo matemático proposto foi capaz de resolver o problema do escoamento da cana-de-açúcar oriunda de 27 pontos canaviais com destino a 5 usinas,

na região do Triângulo Mineiro, para todos os cenários, ao longo de sete dias de operação. Comparando ao modelo apresentado no trabalho de Milan et al. (2006), identifica-se evoluções consideráveis quanto ao período de planejamento da colheita e à prioridade da cana que é colhida, cuja concentração de açúcar é agora analisada.

Os resultados demonstram, por turno de trabalho, a alocação de cada grupo de colheita aos canaviais e a indicação do uso do modal rodoviário em quase todos os trechos canavial-usina, o que pode ser explicado pelos baixos valores do frete rodoviário adotados no país, quando comparados ao frete ferroviário. Para o escoamento da cana em alguns dias da semana, foi apresentada como solução a utilização do modal rodo-ferroviário, mas somente para os cenários em que se simulou a ampliação da malha ferroviária da região, com implantação inclusive de mais terminais ferroviários, em adição aos terminais atualmente existentes, juntamente com a redução significativa dos custos ferroviários adotados.

Quando se analisa, contudo, o custo da tonelada de cana movimentada nestes cenários, constata-se que o percentual de redução apresentado é muito pequeno, não justificando a implementação das simulações propostas. Para o planejamento da colheita no início, no meio ou no final da safra, o modelo também não apontou resultados significativamente diferentes.

Assim sendo, conclui-se com o presente trabalho que os resultados apresentados não são suficientes para justificar investimentos no sistema ferroviário para a movimentação da cana-de-açúcar na região do Triângulo Mineiro, mesmo considerando uma queda substancial no frete ferroviário praticado.

A partir de então, algumas questões começam a ser levantadas, de modo que mais opções rodo-ferroviárias sejam indicadas como solução do modelo matemático e menores custos unitários sejam obtidos: Será que a análise das usinas de forma individual, e não em conjunto, traria resultados mais satisfatórios? E se não houvesse a aglomeração dos pontos canaviais, sendo os mesmos analisados também individualmente? Já para as usinas, não seria mais interessante que a amostra considerasse o total de usinas existentes nos 19 municípios analisados?

Quando se leva em consideração a abordagem por usina, e não mais por um grupo de usinas, não estando portanto obrigatoriamente unidas por uma ação colaborativa, espera-se uma mudança de cenário. Agora, tendo como foco o estudo da usina de forma isolada, o investimento a ser realizado na construção de um terminal de transbordo num canavial próprio e/ou na própria usina, e nas respectivas ligações

férreas a outros terminais existentes, poderia se tornar viável, do ponto de vista financeiro.

Com relação à entrada de dados dos reais pontos geográficos de cada canavial e/ou da ampliação do número de usinas a serem estudadas, não se espera alterações nas análises dos cenários apresentados, em virtude da malha ferroviária limitada da região e dos elevados custos ferroviários praticados. Acredita-se ainda que o envio da cana para vários destinos poderia implicar na diminuição da economia de escala de distribuição e, com isso, inviabilizar ainda mais o uso do modal ferroviário.

Salienta-se contudo que acréscimos referentes, por exemplo, ao número de períodos de colheita e/ou aos pontos de origem e pontos de destino da cana-de-açúcar sobrecarregam demasiadamente a resolução, cuja solução pode se apresentar inviável. Visando a obtenção de uma solução para estes casos, uma alternativa seria a adoção de métodos heurísticos conjuntamente aos métodos exatos propostos, ressaltando que o uso de tais metodologias não implicaria necessariamente na escolha do modal rodoviário como alternativa viável para o escoamento da cana na região em estudo.

Partindo-se do pressuposto de que o aumento do volume que é movimentado implica na redução do custo unitário da mercadoria transportada, aumentando consequentemente a rentabilidade financeira do empreendimento, torna-se importante avaliar no modelo proposto o escoamento de um volume maior de cana-de-açúcar, assim como o escoamento dos produtos acabados gerados pela cadeia agroindustrial, como açúcar e etanol. Nesse sentido, o estudo da localização ótima para a instalação de terminais intermodais e de alocação de novas usinas (ou realocação das usinas existentes) no Triângulo Mineiro, pode ser também foco de abordagens.

Outra sugestão de trabalho diz respeito à programação do corte e do transporte considerando a avaliação individual das usinas, com as respectivas máquinas colhedoras e canaviais para colheita. Além disso, análises da capacidade, velocidade e tempo de espera do caminhão de transporte nos canaviais, do tempo de deslocamento das colhedoras entre os canaviais num mesmo dia de operação, e da inclusão de penalidade ao modelo relacionada ao envio de quantidade de cana abaixo do mínimo considerável rentável para as usinas poderiam ser abordadas em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAR – Association of American Railroads. Disponível em <https://www.aar.org/economy/Pages/Railroad-Investment.aspx#.UZI5J>. Acessado em 19 maio 2013. 2011.

AGEITEC – Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar>. Acessado em 02 maio 2013.

AGROMUNDO. Terminal intermodal de Pirapora amplia capacidade de escoamento da produção mineira. Disponível em <http://www.agromundo.com.br/?p=20216>. Acessado em 02 maio 2013.

AKRON – Florida Sugar Cane Trains. Disponível em <http://akronrrclub.wordpress.com/trackside-tales/florida-sugar-cane-trains/>. Acessado em 23 maio 2013. 2012.

ALVES, L. R. A.. Transmissão de preços entre produtos do setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo. 2002. 107p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, USP, Piracicaba, 2002.

ARENALES, M; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, M.. Pesquisa operacional. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BALLOU, R. H.. Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

- BNDES & CGEE. Bioetanol de cana-de-açúcar: Energia para o desenvolvimento sustentável. Coordenação do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social e do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 316p.
- BOLDIN, L.; GOLDEN, B.. Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, v.11, p.97-108, 1981.
- BRANCO, J. E. H.. Avaliação das localidades ótimas para expansão da oferta de cana-de-açúcar no Brasil: uma aplicação de programação inteira mista. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2012.
- BRANCO, J. E. H. et al.. Desenvolvimento de modelo matemático de otimização logística para o transporte multimodal de safras agrícolas pelo corredor centro-oeste. *Informe Gepec (Impresso)*, v.14, p.84-100, 2010.
- BRANCO, J. E. H. et al.. Otimização logística para o transporte multimodal de safras agrícolas no Brasil com foco no corredor nordeste. *Revista Econômica do Nordeste*, v.43, p.67-92, 2012.
- BRAUNBECK, O.; BAUEN, A.; ROSILLO-CALLEB, F.; CORTEZ, L.. Prospects for green cane harvesting and cane residue use in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v.17, n.6, pp.495-506, dez., 1999.
- BRITO, A.. Brasil Ferrovias fecha contrato de 10 anos com a Bunge Alimentos. *O Estado de São Paulo*, São Paulo, 15 fev. 2005. p.B6.
- BUSINESS REVIEW BRASIL. Produção de grãos deve ser maior do que se esperava. Disponível em http://www.businessreviewbrasil.com.br/money_matters/producao-de-graos. Acessado em 03 jun. 2013.
- CAIXETA-FILHO, J. V. Pesquisa operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2004.
- CAMARGO, P. V. de.; CUNHA, C. B. da.. Um modelo híbrido simulação-otimização para análise de capacidade de um sistema de transporte ferroviário de granéis agrícolas em ciclo fechado. *Journal of Transport Literature*, v.6, n.12, pp.33-65, abr., 2012.
- CANASAT. Canasat - Área - INPE. Disponível em <http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/cultivo.html>. Acessado em 06 dez. 2013. 2013.
- CARVALHO, E. R. de.. Transformações socioterritoriais do capital sucroalcooleiro em Iturama, Portal do Triângulo Mineiro. 2009. 192p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, 2009.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Levantamento de Safra – 4º Levantamento Cana-de-Açúcar Safra 2013/2014. Disponível em http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_10_09_00_57_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_13.pdf. Acessado em 07 set. 2014. 2014.
- CONSECANA – Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo. Manual de Instruções. CONSECANA-SP, Piracicaba-SP, 2006. Disponível em <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=26>. Acessado em 21 maio 2014. 2006.

- DOU – Diário Oficial da União. Seção 1, n.175, segunda-feira, 10 set. 2012. Disponível em <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>. Acessado em 01 out. 2013. 2012.
- EFVM – Estrada de Ferro Vitória Minas S. A.. Disponível em <http://www.efvm.com.br>. Acessado em 19 maio 2013. 2013.
- EHRlich, P. J.. Pesquisa operacional: curso introdutório. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1985.
- FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S. A.. Disponível em <http://www.centro-atlantica.com.br>. Acessado em 19 maio 2013. 2013.
- FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Frete ferroviário no Brasil custa em média US\$ 74; países líderes em logística cobram US\$4. Disponível em <http://www.fiesp.com.br/noticias/frete-ferroviario-no-brasil.html>. Acessado em 16 set. 2013. 2010.
- FISHER, M. L.; JAIKUMAR, R.. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, v.11, p.109-124, 1981.
- GAVIRA, M. de O.. Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2003.
- GRISOTTO, M. E.. Otimização do transporte de cana-de-açúcar por caminhões. 1995. 125p. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 1995.
- GONÇALVES, G. I.. Perspectivas de integração modal rodo-hidro-ferroviária na exportação de produtos agrícolas e minerais no estado de Mato Grosso do Sul. 2008. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2008.
- HAHN, M. H.. SISTEC: Simulador de sistema de transporte da cana-de-açúcar. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 1994.
- HIGGINS, A. et al.. A framework for integrating a complex harvesting and transport system of sugar production. *Agricultural Systems*, v.82, n.2, p.99-115, 2004.
- HIGGINS, A.. Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. *European Journal of Operational Research*, v.170, n.3, pp.987-1000, maio, 2006.
- HIGGINS, A.; DAVIES, I.. A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.47, pp.85-102, 2005.
- IANNONI, A. P.; MORABITO, R.. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. *Transportation Research Part E*, v.42, p.191-210, 2006.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estados@. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=mg>. Acessado em 01 jun. 2013. 2013a.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Área plantada, área colhida, quantidade produzida e valor da produção da lavoura temporária. Disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Acessado em 22 maio 2013. 2013b.

INVESTESP – Portal de Investimentos do Estado de São Paulo. Ferrovia e cana impulsionam Araraquara. Disponível em <http://www.investe.sp.gov.br/noticias/lenoticia.php?id=17860>. Acessado em 02 maio 2013.

JORNALCANA. Produção de cana-de-açúcar deve registrar alta no Triângulo Mineiro. Disponível em <http://www.jornalcana.com.br/noticia/Jornal-Cana/53020+Producao>. Acessado em 02 maio 2013.

JUNQUEIRA, L.; MORATIBO, R.; YAMASHITA, D. S.. Modelos de otimização para problemas de carregamento de contêineres em considerações de estabilidade e de empilhamento. *Pesquisa Operacional*, v.30, n.1, p.73-98, jan.-abr., 2010.

KAWAMURA, M. S.; RONCONI, D. P.; YOSHIZAKI, H.. Optimizing transportation and storage of final products in the sugar and ethanol industry. *International Transactions in Operation Research*, v.13, n.5, p.425-439, 2006.

LACHTERMACHER, G.. *Pesquisa operacional na tomada de decisões*. 4.ed. São Paulo: Pearson Brasil, 2009. 240p.

LAIRD, P. G.. Government rail asset sales, and return to the public sector, in New Zealand and Tasmania. *Research in Transportation Business & Management*, v.6, pp.116-122, 2013.

LANG, A. E.. *As ferrovias no Brasil e avaliação econômica de projetos: uma aplicação em projetos ferroviários*. 2007. 151p. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Universidade de Brasília, UnB, Distrito Federal, 2007.

LÓPEZ, E.; MIQUEL, S.; PLÀ, L. M.. El problema del transporte de la cana de azúcar en Cuba. *Revista de Investigación Operacional*, v.25, p.148-157, 2004.

MAGALHÃES, 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.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Unidades Cadastradas. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar/unidadescadastradas>. Acessado em 25 mar. 2013. 2011.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sistema de Acompanhamento de Produção Canavieira. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>. Acessado em 25 mar. 2013. 2013a.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Evolução da Produtividade e da Produção de Cana-de-Açúcar no Brasil por Ano-Safra. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar/produtividade>. Acessado em 25 mar. 2013. 2013b.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Rendimento de A.T.R. no ano-safra 2013 – 2014. Disponível em http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/producao/JANEIRO_2014/08b_rendimento_atr_2013_2014%281%29.pdf. Acessado em 27 mar. 2014. 2014.

MARTIN, F.; PINKNEY, A.; YU, X.. Cane railway scheduling via constraint logic programming: labelling order and constraints in a real-life application. *Annals of Operations Research*, v.108, pp.193-209, 2001.

MASOUD, M.; KOZAN, E.; KENT, G.. A job-shop scheduling approach for optimising sugarcane rail operations. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, v.23, n.2, pp.181-206, 2011.

MILAN, E. L.; FERNANDEZ, S. M.; ARAGONES, L. M. P.. Sugar cane transportation in Cuba, a case study. *European Journal of Operational Research*, v.174, p.374-386, 2006.

MITsutANI, C.. A logística do etanol de cana-de-açúcar no Brasil: condicionantes e perspectivas. 2010. 103p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2010.

MRSLOGÍSTICA – MRS Logística S. A.. Disponível em <http://www.mrslogistica.com.br>. Acessado em 19 maio 2013.

MT – Ministério dos Transportes. Principais Ferrovias. Disponível em <http://www2.transportes.gov.br/bit/03-ferro/princ-ferro.html>. Acessado em 29 ago. 2012. 2008.

MT – Ministério dos Transportes. Programa de Investimentos em Logística destina R\$ 133 bilhões para rodovias e ferrovias. Disponível em <http://www2.transportes.gov.br/noticia/conteudo/id/65391>. Acessado em 29 ago. 2012. 2012a.

MT – Ministério dos Transportes. Mapa e Geoinformações. Disponível em <http://www.transportes.gov.br/public/arquivo/arq1368557187.pdf>. Acessado em 19 set. 2013. 2012b.

MUNDIM, J. U. C.. Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar. 2009. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2009.

MUNDO DA CANA. Ferrovias de cana em Queensland. Disponível em <http://mundodacana.blogspot.com.br/2010/11/ferrovias-de-cana-em-queensland>. Acessado em 02 maio 2013.

NEUNGMATCHA, W. et al.. Adaptive genetic algorithm for solving sugarcane loading stations with multi-facility services problem. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.98, pp.85-99, 2013.

NOVAES, A. G. N.; BURIN, P. J.; BEZ, E. T.; Scholz-Reiter, B.. Roteirização dinâmica de veículos usando simulação e algoritmo genético. *Transportes (Rio de Janeiro)*, v.19, p.85-92, 2011.

OLIVEIRA, N. M. de. Transporte e localização da agroindústria da soja no estado de Mato Grosso. 2003. 119p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2003.

OLIVEIRA, A. M. K.. Potencial da logística ferroviária para a movimentação de açúcar para exportação no estado de São Paulo: recomendações de localização para armazéns intermodais concentradores de carga. 2005. 166p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, USP, Piracicaba, 2005.

OLIVEIRA, A. M. K.; CAIXETA-FILHO, J. V.. Potencial da logística ferroviária para exportação de açúcar em São Paulo: recomendações de localização para armazéns intermodais. *Revista de Economia e Sociologia Rural (Impresso)*, v.45, p.809-839, 2007.

PREVITALI, F. S. et al.. A expansão da agroindústria sucroalcooleira na região do Triângulo Mineiro/Brasil e implicações sobre o trabalho. In: Esthela Gutiérrez Garza; Dídimo Castillo; Adrián Sotelo. (Org.). *Crisis, reestructuración y precarización Del trabajo en el capitalismo contemporáneo*. 2010.

PUPULIN, R. P.. Sistemas de apoio para programação de colheita em usina de cana-de-açúcar. 2010. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2010.

RF. Estudo de mercado. *Revista Ferroviária*, ano 74, out.-nov.,p.94-106, 2013.

RODRIGUES, S. B. de M.. Avaliação das alternativas de transporte de etanol para exportação na região Centro-Sul. 2007. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2007.

RONEN, D.. Allocation of trips to trucks operating from a single terminal. *Computers and Operations Research*, v.19, n.5, p.445-451, 1992.

RURALBR. Colheita de cana-de-açúcar deve alcançar 616,5 milhões de toneladas na safra 2014/2015, diz Datagro. Disponível em <http://agricultura.ruralbr.com.br/noticia/2014/07/colheita-de-cana-de-acucar-deve-alcancar-616-5-milhoes-de-toneladas-na-safra-2014-2015-diz-datagro-4554447.html>. Acessado em 14 set. 2014. 2014.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C.. *Cana-de-açúcar: bionergia, açúcar e álcool – tecnologia e perspectivas*. Viçosa-MG: Editores, 2010. 577p.

SCHMIDT JUNIOR, J. C.. Avaliação de desempenho efetivo de colhedora de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). 2011. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2011.

SCOPINHO, R. A. et al.. Novas tecnologias e saúde do trabalhador: a mecanização do corte da cana-de-açúcar. *Cadernos de Saúde Pública*, v.15, n.1, p.147-161, jan.-mar., 1999.

SECTES. Desenvolvimento da cadeia de insumos do APL etanol no Triângulo Mineiro. Coordenação da Secretaria do Estado de Ciência Tecnologia e Ensino Superior de Minas Gerais e do Projeto Biodiesel da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: SECTES, 2011.

SILVA, E. de F. P.. Ferrovias: da produção de riquezas ao apoio logístico no Triângulo Mineiro. 2008. 131p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, 2008.

SILVA, J. E. A. R.. Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, UFSarc, São Carlos, 2006.

SILVA NETO, W. A.; CAIXETA-FILHO, J. V.. Logística da exportação de carne bovina: uma aplicação em programação linear. Revista de Economia Mackenzie (Impresso), v.7, p.59-77, 2009.

SIQUEIRA, P. H. de L.. Determinantes da competitividade da agroindústria processadora de cana-de-açúcar das regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – Minas Gerais. 2004. 97p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Universidade de Viçosa, UFV, Viçosa, 2004.

SOUZA, R. J. de.. A logística como instrumento de reestruturação, redução de custos e melhorias na qualidade em agroindústrias: uma aplicação ao setor sucroalcooleiro. 2001. 87p. Dissertação (Mestrado Profissional em Qualidade) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2001.

TAHA, H. A.. Pesquisa operacional: uma visão geral. 8.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TERRA. Hidrovia Tietê-Paraná será estendida em São Paulo. Disponível em <http://transporteelogistica.terra.com.br/noticias/integra/96/hidrovia-tiete>. Acessado em 19 maio 2013. 2013a

TERRA. Empresas investem em ferrovias para otimizar logística. Disponível em <http://transporteelogistica.terra.com.br/noticias/integra/16/empresas-investem>. Acessado em 02 maio 2013. 2013b

TRANSPORTA BRASIL. 58% transportados por rodovias. Disponível em <http://www.transportabrasil.com.br/2010/08/58-transportados-por-rodovias>. Acessado em 03 jun. 2013.

TRIGEIRO, W.W.; THOMAS, L.J.; MCCLAIN, J.O.. Capacitated Lot Sizing With Setup Times. Management Science, v.35, n.3, 353-366, 1989.

UDOP – União dos Produtores de Bioenergia. Desempenho das Safras – Dados Acumulados. Disponível em http://www.udop.com.br/download/estatistica/institucional_economia/12nov13_analise_comparativa_acumulada.pdf. Acessado em 12 dez. 2013. 2013.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. Previsão Safra 2012/2013. Disponível em <http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=9E97665F-3A81-46F2-BF69-26E00C323988>. Acessado em 23 ago. 2013. 2012.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. Previsão Safra 2011/2012. Disponível em <http://www.unica.com.br>. Acessado em 25 mar. 2013. 2013.

USP – Universidade de São Paulo. Agência USP de Notícias. Clima diferencia manejo da cana no Brasil e na Austrália. Disponível em <http://www.usp.br/agen/?p=66403>. Acessado em 18 maio 2013. 2011.

USSUGAR – U. S. Sugar Corp. South Central Florida Express. Disponível em <http://www.ussugar.com/railroad/scfe.html>. Acessado em 23 maio 2013. 2013a.

USSUGAR – U. S. Sugar Corp. Internal Railroad. Disponível em <http://www.ussugar.com/railroad/railroad.html>. Acessado em 23 maio 2013. 2013b.

APÊNDICES

APÊNDICE A

MODELAGENS MATEMÁTICAS IMPLEMENTADAS NO SOFTWARE CPLEX

Quadro 1A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 1 e 2

```
/******  
* OPL 12.4 Model  
* Author: Danielle Martins / Mauro Rocha  
*****/  
  
execute {  
  cplex.EpGap = 0.01; // GAP < 1%  
  //cplex.tilim = 14400; // 4 horas  
  cplex.memoryemphasis = 1; // conserve memory  
}  
  
float inf = ...;  
  
int nCanav = ...;  
int nUsina = ...;  
int nTerm = ...;  
int nGrupos = ...;  
int HorasTurno = ...;  
int nTurnos = ...;  
int nPeriodos = ...;  
int nSemanas = ...;  
int pp = ...;  
float CustoATR = ...;
```

Quadro 1A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 1 e 2 (continuação)

```

range Canav = (nTerm+1)..(nTerm + nCanav);
range Usina = 1..nUsina;

range A_B = 1..(nTerm + nCanav);
range U_A = 1..(nUsina + nTerm);

range Term_A = 1..nTerm;
range Term_U = (nUsina+1)..(nUsina + nTerm);

string sA_B[A_B] = ...;
string sU_A[U_A] = ...;

range K = 1..2;
range K2 = 2..2;
range L = 1..nGrupos;
range L2 = 2..nGrupos;
range Turnos = 1..nTurnos;
range Periodos = 1..nPeriodos;
range Semanas = 1..nSemanas;

float C[K][A_B][U_A] = ...;

float ATR[Canav][0..1] = ...;
float minATR = ...;
float maxATR = ...;

float Mmax[Usina] = ...;

float SP[Term_U] = ...;

float Cap[Canav] = ...;

float pcm[Semanas] = ...;

float Prodl = ...;

float DCanav[Canav][Canav] = ...;

dvar float+ X[A_B][U_A][K][L][Turnos][Periodos];

dvar boolean B[Canav][L][Turnos][Periodos];

dvar boolean Y[Canav][L][Periodos];

// custo de transporte da cana
dexpr float CT_cana = sum( i in A_B, j in U_A, k in K, l in L, m in Turnos, p in Periodos )
    C[k][i][j] * X[i][j][k][l][m][p];

```

Quadro 1A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 1 e 2 (continuação)

```

// custo da penalidade: favorecer os maiores volumes de cana a sairem dos canaviais nos
momentos
// em que estes tiverem maior valor de ATR.
dexpr float C_penalidade = sum( i in Canav, j in U_A, k in K, l in L, m in Turnos, p in Periodos
)
( maxl( ATR[i][1], ATR[i][0] ) - ((ATR[i][1] - ATR[i][0])/(nPeriodos - 1) * (p - 1) +
ATR[i][0])) * X[i][j][k][l][m][p] * CustoATR;

dexpr float CTot = CT_cana + C_penalidade;

minimize CTot;

subject to {

// (1)
// Cada usina não pode receber mais que o limite por hora forall( j in Usina, m in Turnos, p in
Periodos )
sum( i in A_B, k in K2, l in L2 ) X[i][j][k][l][m][p] <= Mmax[j] / 24 * HorasTurno;

// (2)
// Cada terminal não pode receber mais que sua capacidade por hora
forall( j in Term_U, m in Turnos, p in Periodos )
( sum( i in Term_A ) X[i][j][1][1][m][p] ) +
( sum( i in Canav, k in K2, l in L2 ) X[i][j][k][l][m][p] ) <= SP[j] * HorasTurno;

// (3)
// Terminais de ligacao com usinas
forall( j in Term_A, m in Turnos, p in Periodos )
( sum( i in Term_A : i != j ) X[i][nUsina+j][1][1][m][p] ) ==
( sum( u in Usina, k in K2, l in L2 ) X[j][u][k][l][m][p] );

// (4)
// Terminais de recebimento dos canaviais
forall( j in Term_A, m in Turnos, p in Periodos )
( sum( i in Canav, k in K2, l in L2 ) X[i][nUsina+j][k][l][m][p] ) ==
( sum( j2 in Term_A : j2 != j ) X[j][nUsina+j2][1][1][m][p] );

// (5)
// Cada canavial deve escoar toda sua produção da semana pp
forall( i in Canav )
sum( j in U_A, k in K2, l in L2, m in Turnos, p in Periodos )
X[i][j][k][l][m][p] == Cap[i] * pcm[pp];

// (6)
// Limita a quantidade máxima diária de cana colhida nos canaviais por cada grupo de colheita
por hora forall( i in Canav, l in L2, m in Turnos, p in Periodos )
sum( j in U_A, k in K2 ) X[i][j][k][l][m][p] <= Prodl * HorasTurno * B[i][l][m][p];

// (7)
// Determina que cada grupo de colheita trabalhe em apenas um canavial em cada turno do dia
forall( l in L2, m in Turnos, p in Periodos ) sum( i in Canav ) B[i][l][m][p] <= 1;

```

Quadro 1A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 1 e 2 (continuação)

```

// (8)
// Determina que cada canavial tenha diariamente, no máximo, doze grupos de colheita
trabalhando
forall( i in Canav, p in Periodos ) sum( l in L2 ) Y[i][l][p] <= 12;

// (9)
// Determina que o deslocamento de cada grupo de colheita entre os canaviais seja limitado a
uma única vez ao dia
forall( l in L2, p in Periodos ) sum( i in Canav ) Y[i][l][p] <= 2;

// (10)
// Determina que o trabalho de cada grupo de colheita não exceda a carga horária máxima
diária permitida
forall( i in Canav, l in L2, p in Periodos ) sum( m in Turnos ) B[i][l][m][p] <= nTurnos *
Y[i][l][p];

// (11)
// Cada grupo de colheita só pode se deslocar no máximo 50 km em um dia de trabalho
forall( l in L2, p in Periodos )
forall( i in Canav, j in Canav : (i != j) && (DCanav[i][j] > 50)) Y[i][l][p] + Y[j][l][p] <= 1;

// (12)
// Cada grupo de colheita só pode se deslocar no máximo 100 km de um dia para o outro de
trabalho
forall( l in L2, p1 in Periodos, p2 in Periodos : (p2 == p1+1) )
forall( i in Canav, j in Canav : (i != j) && (DCanav[i][j] > 100)) Y[i][l][p1] + Y[j][l][p2] <=
1;
}

execute DISPLAY {

function toFixed(v, width, prec) {
var s = "";
if (prec == 0)
s = s + Opl.round(v);
else {
var m = Opl.pow(10,prec);
s = s + Opl.round(m * v) / m;
var idx = s.indexOf(".");
if (idx >= 0 && idx+prec < s.length)
s = s.substring(0,idx+prec+1);
idx = s.indexOf(".");
if (idx < 0 && prec > 0) {
s = s + ".";
idx = s.length-1;
}
var N = s.length-1 - idx;
for (var i=0; i<prec-N; i++)
s = s + "0";
}
while (s.length < width)
s = " " + s;
}

```

Quadro 1A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 1 e 2 (continuação)

```

return (s);
}

// Mostra solução
var i = 0;
var j = 0;
var k = 0;
var l = 0;
var m = 0;
var p = 0;
var mxATR = 0.0;
writeln("Canavial  Usina  Transporte  Grupo Colheita  Turno  Dia  Qtde (ton.)  $
Transporte  $ Penalidade");
for(p in Periodos )
for(i in A_B )
for(j in U_A )
for(k in K )
for(l in L )
for(m in Turnos )
if (X[i][j][k][l][m][p] > 0.01) {
  if (ATR[i][1] > ATR[i][0])
    mxATR = ATR[i][1];
  else mxATR = ATR[i][0];
  writeln( sA_B[i], "      ", sU_A[j], "      ", k,
          "      ", toFixed( l, 4, 0 ), "      ",
          toFixed( m, 2, 0 ), toFixed( p, 8, 0 ), "      ", toFixed( X[i][j][k][l][m][p], 11, 1 ),
          toFixed( C[k][i][j] * X[i][j][k][l][m][p], 16, 2 ),
          toFixed( (mxATR - ((ATR[i][1] - ATR[i][0])/(nPeriodos - 1) * (p - 1) + ATR[i][0])) *
X[i][j][k][l][m][p] * CustosATR, 15, 2 ));
}
writeln("$ CT_cana      = ", toFixed( CT_cana, 16, 2 ));
writeln("$ C_penalidade = ", toFixed( C_penalidade, 16, 2 ));
writeln("$ Tot. F.O.    = ", toFixed( CTot, 16, 2 ));
writeln("");
}

```

Quadro 2A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 3, 4, 5, 6 e 7

```

/*****
* OPL 12.4 Model
* Author: Danielle Martins / Mauro Rocha
*****/

execute {
  cplex.EpGap = 0.01; // GAP < 1%
  //cplex.tilim = 14400; // 4 horas
  //cplex.memoryemphasis = 1; // conserve memory
}

float inf = ...;

int nCanav = ...;
int nUsina = ...;
int nTerm = ...;
int nGrupos = ...;
int HorasTurno = ...;
int nTurnos = ...;
int nPeriodos = ...;
int nSemanas = ...;
int pp = ...;
float CustosATR = ...;

range Canav = (nTerm+1)..(nTerm + nCanav);
range Usina = 1..nUsina;

range A_B = 1..(nTerm + nCanav);
range U_A = 1..(nUsina + nTerm);

range Term_A = 1..nTerm;
range Term_U = (nUsina+1)..(nUsina + nTerm);

string sA_B[A_B] = ...;
string sU_A[U_A] = ...;

range K = 1..2;
range K2 = 2..2;
range L = 1..nGrupos;
range L2 = 2..nGrupos;
range Turnos = 1..nTurnos;
range Periodos = 1..nPeriodos;
range Semanas = 1..nSemanas;

float C[K][A_B][U_A] = ...;

float ATR[Canav][0..1] = ...;
float minATR = ...;
float maxATR = ...;

float Mmax[Usina] = ...;

```

Quadro 2A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 3, 4, 5, 6 e 7 (continuação)

```

float SP[Term_U] = ...;

float Cap[Canav] = ...;

float pcm[Semanas] = ...;

float Prodl = ...;

float DCanav[Canav][Canav] = ...;

dvar float+ X[A_B][U_A][K][L][Turnos][Periodos];

dvar boolean B[Canav][L][Turnos][Periodos];

dvar boolean Y[Canav][L][Periodos];

// custo de transporte da cana
dexpr float CT_cana = sum( i in A_B, j in U_A, k in K, l in L, m in Turnos, p in Periodos )
    C[k][i][j] * X[i][j][k][l][m][p];

// custo da penalidade: favorecer os maiores volumes de cana a sairem dos canaviais nos
// momentos
// em que estes tiverem maior valor de ATR.
dexpr float C_penalidade = sum( i in Canav, j in U_A, k in K2, l in L2, m in Turnos, p in
Periodos )
    (maxl( ATR[i][1], ATR[i][0] ) - ((ATR[i][1] - ATR[i][0])/(nPeriodos - 1) * (p - 1) +
    ATR[i][0])) * X[i][j][k][l][m][p] * CustoATR;

dexpr float CTot = CT_cana + C_penalidade;

minimize CTot;

subject to {
    // (1)
    // Cada usina não pode receber mais que o limite por hora
    forall( j in Usina, m in Turnos, p in Periodos )
        sum( i in A_B, k in K, l in L ) X[i][j][k][l][m][p] <= Mmax[j] / 24 * HorasTurno;

    // (2)
    // Cada terminal não pode receber mais que sua capacidade por hora
    forall( j in Term_U, m in Turnos, p in Periodos )
        (sum( i in Term_A ) X[i][j][1][1][m][p]) +
        (sum( i in Canav, k in K2, l in L2 ) X[i][j][k][l][m][p]) <= SP[j] * HorasTurno;

    // (3) - (4)
    // Toda cana recebida em algum terminal vindo de canaviais deve ser enviada para usinas
    forall( j in Term_U, m in Turnos, p in Periodos )

```

Quadro 2A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 3, 4, 5, 6 e 7 (continuação)

```

(sum( i in Canav, k in K2, l in L2 ) X[i][j][k][l][m][p]) ==

(sum( u in Usina ) X[j-nUsina][u][1][1][m][p]);

// (5)
// Cada canal deve escoar toda sua produção da semana pp
forall( i in Canav )
    sum( j in U_A, k in K2, l in L2, m in Turnos, p in Periodos )
        X[i][j][k][l][m][p] == Cap[i] * pcm[pp];

// (6)
// Limita a quantidade máxima diária de cana colhida nos canais por cada grupo de colheita
por hora
forall( i in Canav, l in L2, m in Turnos, p in Periodos )
    sum( j in U_A, k in K2 ) X[i][j][k][l][m][p] <= Prodl * HorasTurno * B[i][l][m][p];

// (7)
// Determina que cada grupo de colheita trabalhe em apenas um canal em cada turno do dia
forall( l in L2, m in Turnos, p in Periodos ) sum( i in Canav ) B[i][l][m][p] <= 1;

// (8)
// Determina que cada canal tenha diariamente, no máximo, doze grupos de colheita
trabalhando
forall( i in Canav, p in Periodos ) sum( l in L2 ) Y[i][l][p] <= 12;

// (9)
// Determina que o deslocamento de cada grupo de colheita entre os canais seja limitado a
uma única vez ao dia
forall( l in L2, p in Periodos ) sum( i in Canav ) Y[i][l][p] <= 2;

// (10)
// Determina que o trabalho de cada grupo de colheita não exceda a carga horária máxima
diária permitida
forall( i in Canav, l in L2, p in Periodos ) sum( m in Turnos ) B[i][l][m][p] <= nTurnos *
Y[i][l][p];

// (11)
// Cada grupo de colheita só pode se deslocar no máximo 50 km em um dia de trabalho
forall( l in L2, p in Periodos )
    forall( i in Canav, j in Canav : (i != j) && (DCanav[i][j] > 50)) Y[i][l][p] + Y[j][l][p] <= 1;

// (12)
// Cada grupo de colheita só pode se deslocar no máximo 100 km de um dia para o outro de
trabalho
forall( l in L2, p1 in Periodos, p2 in Periodos : (p2 == p1+1) )
    forall( i in Canav, j in Canav : (i != j) && (DCanav[i][j] > 100)) Y[i][l][p1] + Y[j][l][p2] <=
1;
}

execute DISPLAY {

function toFixed(v, width, prec) {

```

Quadro 2A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 3, 4, 5, 6 e 7 (continuação)

```

var s = "";
if (prec == 0)
    s = s + Opl.round(v);
else {
    var m = Opl.pow(10,prec);
    s = s + Opl.round(m * v) / m;
    var idx = s.indexOf(".");
    if (idx >= 0 && idx+prec < s.length)
        s = s.substring(0,idx+prec+1);
    idx = s.indexOf(".");
    if (idx < 0 && prec > 0) {
        s = s + ".";
        idx = s.length-1;
    }
    var N = s.length-1 - idx;
    for (var i=0; i<prec-N; i++)
        s = s + "0";
    }
while (s.length < width)
    s = " " + s;

return (s);
}

// Mostra solução
var i = 0;
var j = 0;
var k = 0;
var l = 0;
var m = 0;
var p = 0;
var mxATR = 0.0;
writeln("Canavial  Usina  Transporte  Grupo Colheita  Turno  Dia  Qtde (ton.)  $
Transporte  $ Penalidade");
for(p in Periodos )
for(i in A_B )
for(j in U_A )
for(k in K )
for(l in L )
for(m in Turnos )
    if (X[i][j][k][l][m][p] > 0.01) {
        if (i <= nTerm)
            cPen = 0;
        else {
            if (ATR[i][1] > ATR[i][0])
                mxATR = ATR[i][1];
            else mxATR = ATR[i][0];
            cPen = (mxATR - ((ATR[i][1] - ATR[i][0])/(nPeriodos - 1) * (p - 1) + ATR[i][0])) *
X[i][j][k][l][m][p] * CustosATR;
        }
    }

```

Quadro 2A – Comandos inseridos no software Cplex para a formulação dos Cenários 3, 4, 5, 6 e 7 (continuação)

```
writeln( sA_B[i], "      ", sU_A[j], "      ", k,
        "      ", toFixed( 1, 4, 0 ), "      ",
        toFixed( m, 2, 0 ), toFixed( p, 8, 0 ), "      ", toFixed( X[i][j][k][l][m][p], 11, 1 ),
        toFixed( C[k][i][j] * X[i][j][k][l][m][p], 16, 2 ),
        toFixed( cPen, 15, 2 ));
}
writeln("$ CT_cana      = ", toFixed( CT_cana, 16, 2 ));
writeln("$ C_penalidade = ", toFixed( C_penalidade, 16, 2 ));
writeln("$ Tot. F.O.    = ", toFixed( CTot, 16, 2 ));
writeln("");
}
```

APÊNDICE B

SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 1

Quadro 1B – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 1 no primeiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
AR1-U1	Rodovia	7.560,0	32.583,6	0,0	5, 9, 11, 16, 18, 19, 20, 29, 41, 59, 81, 82
CN1-U1	Rodovia	1.620,0	9.768,6	0,0	36, 40, 43, 48, 58
PT2-U1	Rodovia	1.963,6	32.127,3	0,0	25, 37, 42, 46, 76, 84, 96, 100
CG2-U2	Rodovia	1.015,0	6.120,3	0,0	110
CA2-U3	Rodovia	5.939,1	107.378,3	0,0	15, 17, 23, 27, 63, 64, 66, 70, 77, 78, 87
CF2-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	0,0	7, 8, 10, 12, 13, 30, 50, 67, 68, 75, 101, 107,
UD1-U3	Rodovia	175,4	2.719,2	0,0	49
VR1-U3	Rodovia	3.227,2	27.786,5	0,0	14, 33, 44, 53,
FN1-U4	Rodovia	8.640,0	81.820,8	0,0	4, 6, 21, 22, 26, 34, 45, 55, 62, 65, 74, 104
FL1-U4	Rodovia	1.528,0	10.526,8	48,9	60, 71, 73, 80, 89, 91, 99
UB2-U5	Rodovia	6.829,9	141.106,0	0,0	2, 3, 47, 51, 52, 61, 69, 79, 83, 88, 94, 97
AC2-U5	Rodovia	8.640,0	111.542,4	0,0	24, 28, 31, 32, 35, 39, 56, 85, 86, 90, 93, 98
TOTAL		55.778,2	615.579,0	48,9	

Quadro 2B – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 1 no segundo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
AR1-U1	Rodovia	187,7	809,0	25,6	5, 41
CN1-U1	Rodovia	2.299,6	13.866,8	164,7	5, 19, 29, 41, 81, 82, 95
PT2-U1	Rodovia	6.532,6	106.875,0	318,3	25, 37, 42, 46, 49, 54, 76, 84, 102, 108
MA1-U1	Rodovia	367,9	5702,9	252,3	11
AG1-U1	Rodovia	1.755,8	49.882,7	26,7	51, 79, 83
FN1-U2	Rodovia	591,4	7127,0	27,5	4, 60, 91
CF2-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	1.711,7	17, 22, 44, 64, 66, 67, 78, 80, 101, 103, 106, 110
UD1-U3	Rodovia	3.711,1	57.523,4	345,0	2, 52, 68, 88, 97, 107
VR1-U3	Rodovia	5.630,5	48.479,0	609,3	13, 14, 15, 23, 24, 30, 31, 35, 50, 53, 56, 57
FN1-U4	Rodovia	5.747,1	54.423,2	266,9	4, 6, 10, 26, 45, 60, 71, 73, 74, 75, 89, 91
FL1-U4	Rodovia	4.420,9	30.460,2	117,9	12, 21, 55, 92, 99, 104, 105, 109
AC2-U5	Rodovia	6928,0	89.440,8	390,7	3, 32, 39, 47, 63, 69, 70, 77, 93, 94, 98
TOTAL		46.812,6	516.689,2	4.256,6	

Quadro 3B – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 1 no terceiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT2-U1	Rodovia	2.668,4	43.654,3	260,3	68, 85, 88, 102
MA1-U1	Rodovia	2.880,0	44.640,0	1.580,2	5, 19, 76, 81
TG1-U1	Rodovia	1.440,0	18.590,4	1.075,4	7, 54
AG1-U1	Rodovia	1.260,0	35.796,6	38,4	8, 9, 48
CF2-U3	Rodovia	482,2	2.907,7	191,0	92, 104
UD1-U3	Rodovia	8.100,0	125.550,0	1.506,2	34, 35, 36, 40, 43, 49, 52, 56, 62, 64, 65, 97,
VR1-U3	Rodovia	3.194,0	27.500,4	691,2	2, 15, 17, 18, 27, 30, 31, 44, 53, 80
VR2-U3	Rodovia	6.205,4	90.786,8	1.097,0	13, 16, 24, 35, 38, 39, 40, 43, 94, 98, 100, 103
FN1-U4	Rodovia	1.888,0	17.877,8	175,5	6, 21, 22, 33, 55, 58, 87, 89, 110
FL1-U4	Rodovia	8.280,0	57.049,2	176,6	4, 6, 59, 60, 61, 86, 90, 91, 96, 105, 109, 110
TOTAL		36.398,0	464.353,2	6.791,8	

Quadro 4B – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 1 no quarto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	7.351,2	113.947,9	3.024,7	14, 23, 63, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 88
TG1-U1	Rodovia	3.792,3	48.958,5	2.123,9	5, 7, 9, 54, 81, 99
PL1-U2	Rodovia	668,9	9.785,7	168,2	29, 37, 79, 83
FL2-U2	Rodovia	5.228,8	18.039,3	872,6	4, 6, 15, 18, 31, 32, 41, 44, 45, 47, 53, 96
CA1-U3	Rodovia	2.428,5	29.263,9	38,9	3, 20, 24, 29, 37, 38, 72, 77, 92, 95
PJ1-U3	Rodovia	2.499,4	15.071,9	1.377,1	3, 17, 34, 56, 82, 90, 91, 93, 94, 100, 103
UD1-U3	Rodovia	7.020,0	108.810,0	1.957,8	16, 27, 39, 40, 49, 65, 75, 80, 98, 101, 102, 107
VR1-U3	Rodovia	93,7	807,0	30,4	92
VR2-U3	Rodovia	5.940,0	86.902,2	1.575,1	2, 11, 26, 27, 39, 46, 49, 50, 75, 97, 98, 107
FN1-U4	Rodovia	1.888,0	17.877,8	263,2	33, 87, 89, 108
FL1-U4	Rodovia	8.280,0	57.049,2	132,5	21, 22, 25, 33, 42, 51, 55, 57, 58, 61, 78, 84
AC1-U5	Rodovia	88,0	985,0	13,7	10
TOTAL		45.278,8	507.498,4	11.578,1	

Quadro 5B – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 1 no quinto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	8.640,0	133.920,0	2.370,2	5, 7, 9, 12, 23, 43, 54, 59, 60, 81, 88, 99
TG1-U1	Rodovia	1.440,0	18.590,4	537,6	14, 68
PL1-U2	Rodovia	4.476,6	65.493,5	750,6	13, 24, 33, 35, 41, 45, 64, 79, 83, 103, 108
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	961,4	44, 48, 53, 55, 57, 58, 62, 78, 85, 87, 91, 94
CA1-U3	Rodovia	3.510,5	42.301,9	37,4	2, 10, 11, 19, 26, 29, 38, 50, 76, 86, 92, 97
CF1-U3	Rodovia	5.831,2	40.177,0	248,8	3, 6, 8, 17, 75, 77, 80, 101, 105, 106, 107, 110
PJ1-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	3.173,3	4, 15, 18, 20, 25, 40, 51, 72, 82, 84, 89, 96
PL1-U4	Rodovia	4.163,4	60.909,7	698,0	13, 24, 33, 35, 36, 41, 45, 64, 79, 83
FL1-U4	Rodovia	5.040,0	34.725,6	53,8	21, 28, 31, 32, 42, 52, 61
CQ1-U5	Rodovia	186,7	1.447,1	17,1	109
DE1-U5	Rodovia	141,5	488,1	40,3	109
AC1-U5	Rodovia	1.440,0	16.113,6	149,2	37, 56
TOTAL		52.149,9	496.074,1	9.037,7	

Quadro 6B – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 1 no sexto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	1.440,0	22.320,0	197,5	59, 81
TG1-U1	Rodovia	4.320,0	55.771,2	806,4	30, 43, 65, 68, 88, 100
PL1-U2	Rodovia	1.620,0	23.700,6	135,8	11, 35, 51, 55, 58, 79, 83
PT1-U2	Rodovia	898,5	10.053,5	106,1	5, 12, 34, 57, 60, 104, 106
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	480,5	6, 8, 32, 41, 42, 44, 48, 49, 52, 61, 77, 84
CF1-U3	Rodovia	7.715,4	53.158,8	164,6	71, 74, 75, 80, 85, 86, 91, 92, 104, 105, 106, 110
PJ1-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	1.586,9	24, 25, 28, 29, 31, 46, 67, 76, 87, 94, 96, 97
PT1-U3	Rodovia	1.626,3	15.401,9	192,1	12, 23, 57, 85
PL1-U4	Rodovia	7.020,0	102.702,6	588,5	10, 11, 26, 35, 51, 53, 55, 58, 62, 78, 79, 83
FL1-U4	Rodovia	2.160,0	14.882,4	11,5	15, 18, 33
UB1-U5	Rodovia	709,9	5.501,8	62,8	27, 37, 56, 73
CQ1-U5	Rodovia	8.640,0	66.960,0	395,0	16, 22, 39, 47, 63, 66, 69, 90, 93, 95, 102, 109
DE1-U5	Rodovia	1.440,0	4.968,0	205,2	27, 56, 73
AC1-U5	Rodovia	8.460,0	94.667,4	438,5	2, 4, 13, 19, 20, 37, 64, 70, 72, 89, 98, 103
TOTAL		63.330,1	551.995,4	5.371,4	

Quadro 7B – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 1 no sétimo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	2.160,0	33.480,0	0,0	38, 60, 65
TG1-U1	Rodovia	8.640,0	111.542,4	0,0	30, 36, 43, 45, 68, 81, 82, 88, 100, 101, 107, 108
PT1-U2	Rodovia	3.513,8	39.320,6	0,0	5, 17, 31, 32, 34, 42, 52, 57, 59, 80, 85, 97
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	0,0	11, 23, 29, 41, 61, 71, 74, 75, 77, 78, 92, 104
CG1-U2	Rodovia	1.015,0	12.230,4	0,0	33, 106
CF1-U3	Rodovia	4.215,8	29.045,8	0,0	9, 12, 14, 21, 28, 84, 86, 105, 110
PJ1-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	0,0	8, 24, 25, 35, 48, 58, 67, 70, 76, 79, 89, 91
PT1-U3	Rodovia	5.126,2	48.544,1	0,0	5, 17, 31, 32, 34, 42, 52, 57, 59, 80, 85, 97
PL1-U4	Rodovia	8.640,0	126.403,2	0,0	6, 15, 18, 44, 46, 49, 51, 53, 62, 83, 87, 94
FL1-U4	Rodovia	1.440,0	9.921,6	0,0	55, 96
UB1-U5	Rodovia	6.120,0	47.430,0	0,0	2, 7, 13, 16, 40, 47, 54, 63, 64, 72, 98, 99
CQ1-U5	Rodovia	6.480,0	50.220,0	0,0	22, 27, 39, 50, 66, 69, 73, 90, 93, 95, 102, 109
DE1-U5	Rodovia	5.580,0	19.251,0	0,0	3, 4, 16, 19, 20, 22, 27, 37, 39, 40, 95, 102
AC1-U5	Rodovia	5.580,0	62.440,2	0,0	2, 4, 10, 13, 19, 20, 26, 54, 56, 64, 98, 103
TOTAL		75.790,8	671.736,5	0,0	

APÊNDICE C

SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 2

Quadro 1C – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 2 no primeiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
AR1-U1	Rodovia	7.747,7	33.392,6	0	3, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 59, 61, 73, 80, 90
CN1-U1	Rodovia	1.415,9	8.537,6	0	42, 48, 51, 71
PT2-U1	Rodovia	1.980,1	32.396,3	0,0	9, 11, 17, 91
CG2-U2	Rodovia	1.015,0	6.120,3	0,0	60, 85, 98
CA2-U3	Rodovia	5.939,1	107.378,3	0,0	5, 15, 18, 22, 62, 67, 70, 71, 92, 103
CF2-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	0,0	2, 4, 8, 24, 28, 45, 53, 56, 58, 68, 77, 88
VR1-U3	Rodovia	3.402,7	29.297,0	0,0	7, 44, 101, 104, 107, 110
FN1-U4	Rodovia	8.640,0	81.820,8	0,0	10, 20, 21, 25, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 43
UB2-U5	Rodovia	6.829,9	141.106,0	0,0	16, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100, 105, 106, 108
AC2-U5	Rodovia	8.640,0	111.542,4	0,0	6, 26, 27, 54, 55, 64, 65, 69, 72, 74, 76, 109
TOTAL		54.250,40	603.690,50	0,00	

Quadro 2C – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 2 no segundo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
CN1-U1	Rodovia	2.503,6	15.097,7	179,3	3, 48, 50, 80
PT2-U1	Rodovia	8.640,0	141.350,4	421,0	9, 12, 29, 30, 32, 33, 52, 60, 63, 66, 91, 102
CF2-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	1.711,7	15, 24, 25, 39, 40, 45, 57, 58, 77, 103, 104, 110
UD1-U3	Rodovia	1.726,5	26.762,7	160,5	2, 56, 105
VR1-U3	Rodovia	7.615,1	65.566,1	824,1	5, 7, 14, 28, 31, 44, 53, 54, 55, 62, 64, 92
FN1-U4	Rodovia	8.640,0	81.820,8	401,3	4, 19, 20, 21, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89
FL1-U4	Rodovia	225,9	1.556,6	6,0	13, 98
AC2-U5	Rodovia	6.928,0	89.440,8	390,7	6, 22, 67, 70, 74, 75, 94, 95, 97, 101, 107
TOTAL		44.919,10	473.694,30	4.094,60	

Quadro 3C – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 2 no terceiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT2-U1	Rodovia	544,6	8.909,8	53,1	26, 46
AG1-U1	Rodovia	3.015,8	85.679,3	92,0	17, 73, 76, 84, 106
CF2-U3	Rodovia	482,2	2.907,7	191,1	2, 79, 92
UD1-U3	Rodovia	8.640,0	133.920,0	1.606,6	7, 8, 23, 29, 30, 32, 33, 35, 45, 47, 49, 93
VR1-U3	Rodovia	1.127,8	9.709,8	244,0	55, 105
VR2-U3	Rodovia	7.731,8	113.116,2	1.366,8	18, 25, 27, 34, 43, 57, 59, 62, 78, 101, 107, 109
FN1-U4	Rodovia	1.474,1	13.959,2	137,0	51, 61, 103
FL1-U4	Rodovia	8.640,0	59.529,6	184,3	13, 15, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 85, 86, 87, 104
TOTAL		31.656,30	427.731,60	3.874,90	

Quadro 4C – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 2 no quarto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	8.471,9	131.313,9	3.485,7	21, 58, 63, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 74, 75, 77
TG1-U1	Rodovia	912,3	11.777,7	510,9	22, 54, 84, 90
PL1-U2	Rodovia	720,0	10.533,6	181,0	5, 53, 91, 96
FL2-U2	Rodovia	5.228,8	18.039,3	872,6	9, 10, 31, 55, 56, 79, 80, 110
CA1-U3	Rodovia	988,5	11.911,9	15,8	25, 43, 83, 89
PJ1-U3	Rodovia	3.939,5	23.755,1	2.170,4	3, 16, 27, 34, 38, 57, 87, 89, 94, 103, 104
UD1-U3	Rodovia	8.640,0	133.920,0	2.409,6	6, 7, 11, 12, 14, 26, 32, 64, 81, 82, 98, 101
VR2-U3	Rodovia	4.413,7	64.572,8	1.170,4	18, 19, 23, 30, 33, 59, 72, 99, 102, 105
FL1-U4	Rodovia	8.640,0	59.529,6	138,2	20, 24, 28, 36, 37, 39, 41, 42, 48, 50, 60, 88
PL1-U4	Rodovia	848,9	12.419,1	213,5	4, 91, 92, 103
TOTAL		42.803,60	477.773,00	11.168,10	

Quadro 5C – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 2 no quinto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	8.263,6	128.088,4	2.267,0	22, 54, 57, 58, 62, 63, 67, 70, 73, 76, 78, 93
TG1-U1	Rodovia	2.880,0	37.180,8	1.075,2	21, 29, 71, 84
PL1-U2	Rodovia	4.524,0	66.187,0	758,5	9, 10, 25, 40, 60, 83, 86, 91, 103, 104, 109
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	961,4	8, 38, 39, 42, 45, 49, 68, 92, 94, 95, 97, 107
PT1-U2	Rodovia	4,8	54,0	1,1	30
CA1-U3	Rodovia	3.639,5	43.856,4	38,8	3, 15, 35, 72, 87, 100, 102
CF1-U3	Rodovia	5.702,1	39.288,2	243,3	11, 12, 30, 31, 34, 43, 64, 80, 81, 101, 105
PJ1-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	3.173,3	4, 6, 7, 13, 16, 17, 24, 26, 36, 46, 48, 82
PL1-U4	Rodovia	4.116,0	60.216,2	690,1	9, 10, 20, 25, 60, 83, 86, 91, 103, 104, 109
FL1-U4	Rodovia	6.052,0	41.697,6	64,6	50, 51, 52, 53, 55, 61, 79
CQ1-U5	Rodovia	906,7	7.027,1	82,9	2, 85
AC1-U5	Rodovia	88,0	985,0	9,1	89
TOTAL		53.456,70	506.487,90	9.365,30	

Quadro 6C – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 2 no sexto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	3.943,6	61.128,4	541,0	54, 58, 62, 63, 78, 98
TG1-U1	Rodovia	7.200,0	92.952,0	1.344,0	21, 22, 29, 32, 67, 71, 73, 76, 84, 93
PL1-U2	Rodovia	2.544,6	37.228,2	213,3	9, 24, 25, 51, 91, 97, 107
PT1-U2	Rodovia	1.689,3	18.902,8	199,5	3, 4, 8, 57, 70, 101
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	480,5	11, 12, 28, 34, 38, 39, 43, 46, 52, 66, 68, 95
CG1-U2	Rodovia	294,9	3.554,4	41,4	53
CF1-U3	Rodovia	7.380,0	50.848,2	157,4	3, 4, 13, 15, 31, 35, 42, 49, 64, 72, 94, 105
PJ1-U3	Rodovia	7.920,0	47.757,6	1.454,6	6, 17, 20, 40, 42, 45, 59, 65, 79, 80, 81, 82
PT1-U3	Rodovia	2.090,7	19.799,3	246,9	4, 8, 57, 70, 72, 101
CA1-U3	Rodovia	590,9	7.121,5	3,2	74
PL1-U4	Rodovia	5.735,4	83.908,2	480,8	5, 9, 17, 24, 25, 48, 50, 51, 55, 97, 107
FL1-U4	Rodovia	4.432,6	30.539,8	23,7	41, 60, 61, 86, 92, 96, 108, 109
UB1-U5	Rodovia	1.789,9	13.871,8	158,2	14, 33, 77
CQ1-U5	Rodovia	7.920,0	61.380,0	362,1	2, 18, 37, 47, 56, 69, 75, 85, 88, 90, 106
DE1-U5	Rodovia	321,5	1.109,1	45,8	77
AC1-U5	Rodovia	8.640,0	96.681,6	447,8	7, 10, 16, 19, 23, 26, 83, 89, 99, 100, 103, 110
TOTAL		71.133,40	656.590,90	6.200,20	

Quadro 7C – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 2 no sétimo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	2.160,0	33.480,0	0,0	22, 32, 84
TG1-U1	Rodovia	8.640,0	111.542,4	0,0	21, 29, 58, 62, 63, 67, 71, 73, 76, 93, 98, 104
PL1-U2	Rodovia	1.090,8	15.955,8	0,0	6, 38, 61, 68, 74, 83
PT1-U2	Rodovia	2.718,4	30.417,3	0,0	8, 28, 42, 45, 54, 59, 64, 66, 72, 94
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	0,0	4, 9, 11, 13, 39, 46, 53, 70, 86, 96, 97, 108
CG1-U2	Rodovia	720,0	8.676,0	0,0	57
CF1-U3	Rodovia	4.680,0	32.245,2	0,0	15, 35, 42, 45, 52, 65, 95, 101, 105
PJ1-U3	Rodovia	7.920,0	47.757,6	0,0	3, 31, 34, 48, 49, 52, 55, 60, 65, 80, 82, 103
PT1-U3	Rodovia	4.661,6	44.146,7	0,0	8, 28, 35, 42, 45, 54, 59, 64, 66, 72, 78
CA1-U3	Rodovia	720,0	8.676,0	0,0	107
PL1-U4	Rodovia	7.009,2	102.547,2	0,0	6, 38, 40, 41, 43, 50, 61, 68, 74, 81, 83, 103
FL1-U4	Rodovia	3.158,0	21.761,8	0,0	12, 17, 79, 91, 92, 109
UB1-U5	Rodovia	5.040,0	39.060,0	0,0	2, 10, 16, 27, 44, 47, 75, 85, 87, 89, 99, 100
CQ1-U5	Rodovia	6.480,0	50.220,0	0,0	14, 30, 36, 37, 56, 69, 77, 88, 90, 102
DE1-U5	Rodovia	6.840,0	23.598,0	0,0	16, 18, 26, 33, 36, 37, 44, 85, 89, 99, 106, 110
AC1-U5	Rodovia	6.840,0	76.539,6	0,0	5, 7, 10, 19, 20, 23, 24, 25, 51, 87
TOTAL		77.318,00	676.431,60	0,0	

APÊNDICE D

SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 3

Quadro 1D – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 3 no primeiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
AR1-U1	Rodovia	7.747,7	33.392,6	0,0	5, 17, 20, 33, 38, 51, 52, 68, 90, 99, 102
CN1-U1	Rodovia	1.411,2	8.509,8	0,0	10, 30, 52, 63, 75
PT2-U1	Rodovia	1.984,7	32.471,7	0,0	19, 47, 56, 59, 95, 106, 107
CG2-U2	Rodovia	1.015,0	6.120,3	0,0	48, 49, 53, 58, 91, 100
CA2-U3	Rodovia	5.938,9	107.378,3	0,0	2, 23, 28, 32, 42, 45, 55
CF2-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	0,0	9, 11, 15, 37, 44, 65, 69, 73, 78, 82, 93, 108
VR1-U3	Rodovia	3.402,6	29.297,0	0,0	7, 12, 24, 43, 67, 62, 70, 83, 86, 88
FN1-U4	Rodovia	8.640,0	81.820,8	0,0	13, 26, 31, 36, 54, 57, 85, 97, 98, 104, 105, 109
FL1-U4	Rodovia	1.080,0	7.441,2	34,6	25, 39, 50
UB2-U5	Rodovia	6.829,9	141.106,0	0,0	3, 6, 18, 21, 29, 34, 76, 77, 80, 96
AC2-U5	Rodovia	8.640,0	111.542,4	0,0	14, 16, 27, 41, 46, 60, 64, 66, 87, 92, 94, 110
TOTAL		55.330,00	611.179,30	34,60	

Quadro 2D – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 3 no segundo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
CN1-U1	Rodovia	2.503,6	15.097,7	179,3	10, 17, 20, 22, 30, 63, 68, 90
PT2-U1	Rodovia	8.640,0	141.350,4	421,0	19, 35, 40, 48, 56, 59, 71, 72, 84, 95, 106, 107
CF2-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	1.711,7	8, 12, 23, 25, 42, 43, 45, 55, 58, 73, 86, 109
UD1-U3	Rodovia	2.086,6	32.342,7	194,0	9, 11, 15, 34, 47, 80, 103
VR1-U3	Rodovia	7.255,0	62.466,6	785,2	2, 4, 24, 28, 53, 60, 64, 78, 82, 92, 94, 110
FN1-U4	Rodovia	8.640,0	81.820,8	401,3	26, 37, 39, 44, 49, 61, 65, 79, 89, 93, 98, 108
FL1-U4	Rodovia	1.528,0	10.526,8	40,8	13, 57, 69, 97, 104, 105
AC2-U5	Rodovia	6.928,0	89.440,8	390,7	3, 6, 14, 16, 18, 21, 32, 41, 46, 62, 76, 101
TOTAL		46.221,20	485.145,00	4.124,00	

Quadro 3D – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 3 no terceiro dia de operação

Tr2cho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT3-U1	Rodovia	540,0	8.834,4	52,7	52, 56
AG1-U1	Rodovia	3.015,8	85.679,3	92,0	31, 66, 74, 87, 99
MA1-U1	Rodovia	175,6	2.722,3	96,4	83
CF2-U3	Rodovia	482,2	2.907,7	191,1	49, 61, 102
UD1-U3	Rodovia	8.640,0	133.920,0	1.606,6	4, 8, 15, 35, 51, 60, 77, 80, 85, 100, 107, 109
VR1-U3	Rodovia	1.487,7	12.809,4	321,9	2, 3, 11, 21, 45, 78
VR2-U3	Rodovia	7.371,8	107.849,4	1.303,2	5, 6, 9, 18, 32, 34, 38, 41, 47, 73, 82, 94
FN1-U4	Rodovia	1.474,1	13.959,2	137,0	7, 12, 23, 36, 65, 69, 81
FL1-U4	Rodovia	9.180,0	68.364,0	237,0	27, 29, 57, 67, 88, 89, 91, 96, 97, 98, 108
TOTAL		32.367,2	437.045,7	4.037,9	

Quadro 4D – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 3 no quarto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	8.640,0	133.920,0	3.554,9	10, 28, 44, 52, 54, 55, 63, 70, 75, 83, 92
TG1-U1	Rodovia	224,8	2.901,6	125,9	14
CN1-U1	Rodovia	4,6	27,8	1,0	40
PL1-U2	Rodovia	180,0	2.633,4	45,3	26
FL2-U2	Rodovia	5.287,2	18.240,7	882,4	2, 13, 16, 29, 50, 64, 67, 78, 90, 97, 106
CA1-U3	Rodovia	2.428,5	29.263,9	38,9	5, 6, 11, 19, 49, 72, 86
PJ1-U3	Rodovia	2.499,5	15.071,9	1.377,1	5, 19, 26, 35, 36, 41, 53, 80, 93, 95, 109
UD1-U3	Rodovia	8.280,0	128.340,0	2.309,2	9, 22, 24, 38, 39, 45, 60, 79, 94, 102, 103, 105
VR2-U3	Rodovia	4.773,7	69.839,6	1.265,8	3, 4, 17, 25, 30, 34, 43, 47, 68, 107
FL1-U4	Rodovia	8.640,0	59.529,6	138,2	20, 27, 37, 46, 59, 61, 65, 71, 88, 101, 108, 110
PL1-U4	Rodovia	488,9	7.152,3	122,9	11, 72
TOTAL		41.447,20	466.920,80	9.861,60	

Quadro 5D – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 3 no quinto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	8.640,0	133.920,0	2.370,2	10, 12, 14, 21, 23, 40, 48, 57, 70, 73, 76, 87
TG1-U1	Rodovia	2.503,6	32.323,7	934,8	28, 42, 55, 56, 62, 104
PL1-U2	Rodovia	4.587,2	67.111,8	769,1	2, 5, 6, 8, 16, 27, 49, 50, 66, 84, 88, 109
FL2-U2	Rodovia	8.581,6	29.606,6	954,9	31, 36, 41, 58, 64, 78, 85, 90, 93, 98, 100, 110
CA1-U3	Rodovia	3.510,4	42.301,9	37,4	3, 30, 33, 47, 80, 81, 91
CF1-U3	Rodovia	5.831,2	40.177,0	248,8	13, 17, 35, 38, 45, 53, 68, 69, 102
PJ1-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	3.173,3	4, 9, 11, 19, 20, 25, 37, 39, 59, 86, 95, 107
PL1-U4	Rodovia	4.052,8	59.291,4	679,5	2, 5, 6, 8, 16, 27, 49, 50, 66, 84, 88, 109
FL1-U4	Rodovia	6.041,0	41.622,0	64,4	7, 18, 29, 67, 77, 96, 99, 106
CQ1-U5	Rodovia	1.446,7	11.212,1	132,3	32, 51, 74, 82
AC1-U5	Rodovia	628,0	7.027,6	65,1	15, 72
UB1-U5	Rodovia	169,9	1.316,8	30,0	15
TOTAL		54.632,40	518.010,10	9.459,80	

Quadro 6D – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 3 no sexto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	2.880,0	44.640,0	395,0	43, 56, 70, 71
TG1-U1	Rodovia	8.263,6	106.685,3	1.542,6	12, 14, 21, 23, 42, 55, 62, 73, 76, 94, 104, 105
PL1-U2	Rodovia	3.175,1	46.452,2	266,2	31, 47, 50, 58, 77, 85, 89, 98, 109
PT1-U2	Rodovia	898,5	10.053,5	106,1	10, 40, 48, 87
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	480,5	2, 4, 7, 17, 29, 35, 41, 68, 69, 75, 78, 99
CF1-U3	Rodovia	7.715,3	53.158,8	164,6	11, 20, 25, 37, 52, 53, 61, 83, 90, 93, 110
PJ1-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	1.586,9	13, 36, 38, 39, 44, 45, 66, 80, 88, 100, 102, 107
PT1-U3	Rodovia	1.626,3	15.401,9	192,1	10, 40, 48, 87
PL1-U4	Rodovia	5.464,9	79.951,0	458,1	30, 31, 47, 49, 50, 58, 64, 77, 85, 89, 98, 109
FL1-U4	Rodovia	3.780,0	26.044,2	20,2	8, 18, 67, 84, 96, 106
UB1-U5	Rodovia	2.160,0	16.740,0	190,9	15, 54, 72, 101
CQ1-U5	Rodovia	8.640,0	66.960,0	395,0	24, 26, 32, 34, 51, 63, 65, 74, 82, 92, 103, 108
DE1-U5	Rodovia	1.041,5	3.593,1	148,4	15, 22, 54
AC1-U5	Rodovia	8.640,0	96.681,6	447,8	3, 6, 9, 33, 46, 60, 79, 81, 86, 91, 95, 97
TOTAL		71.565,20	648.268,80	6.394,40	

Quadro 7D – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 3 no sétimo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	2.503,6	38.808,4	0,0	23, 43, 56, 76
TG1-U1	Rodovia	8.640,0	111.542,4	0,0	5, 12, 14, 21, 42, 55, 59, 62, 73, 94, 104, 105
PT1-U2	Rodovia	3.514,0	39.320,6	0,0	11, 13, 20, 25, 29, 37, 41, 66, 70, 71, 93, 110
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	0,0	8, 10, 40, 47, 52, 58, 75, 83, 87, 89, 90, 98
CG1-U2	Rodovia	1.015,1	12.230,4	0,0	61, 67
CF1-U3	Rodovia	4.215,5	29.045,8	0,0	4, 7, 17, 35, 48, 53
PJ1-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	0,0	2, 31, 33, 36, 44, 78, 79, 88, 96, 99, 100, 107
PT1-U3	Rodovia	5.126,0	48.544,1	0,0	11, 20, 25, 29, 37, 41, 66, 70, 71, 93, 110
PL1-U4	Rodovia	8.640,0	126.403,2	0,0	18, 39, 46, 49, 57, 68, 80, 81, 84, 85, 102, 106
FL1-U4	Rodovia	1.440,0	9.921,6	0,0	45, 69
UB1-U5	Rodovia	4.500,0	34.875,0	0,0	3, 6, 9, 15, 16, 22, 27, 60, 86, 91, 95, 97
CQ1-U5	Rodovia	5.220,0	40.455,0	0,0	19, 24, 26, 28, 32, 51, 63, 65, 92, 101, 103, 108
DE1-U5	Rodovia	6.120,0	21.114,0	0,0	3, 9, 19, 22, 26, 28, 34, 54, 74, 82, 92, 101
AC1-U5	Rodovia	6.300,0	70.497,0	0,0	15, 27, 30, 38, 50, 64, 72, 77, 95, 97, 109
TOTAL		74.514,20	664.664,70	0,0	

Quadro 8D – Trecho canavial-usina selecionado ao longo da semana, em quilômetros, pelo cenário 3

Canavial	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
PL1				U2: 65,2 U4: 66,4	U2: 65,2 U4: 66,4	U2: 65,2 U4: 66,4	U4: 66,4
FN1	U4: 37,5	U4: 37,5	U4: 37,5				
AR1	U1: 8,1						
CN1	U1: 18,8	U1: 18,8		U1: 18,8			
CA1				U3: 50,2	U3: 50,2		
CA2	U3: 82,2						
UB1					U5: 28,4	U5: 28,4	U5: 28,4
UB2	U5: 104,0						
CF1					U3: 21,4	U3: 21,4	U3: 21,4
CF2	U3: 16,8	U3: 16,8	U3: 16,8				
PJ1				U3: 19,7	U3: 19,7	U3: 19,7	U3: 19,7
PT1						U2: 48,5 U3: 36,2	U2: 48,5 U3: 36,2
PT2	U1: 78,8	U1: 78,8	U1: 78,8				
FL1	U4: 22,2	U4: 22,2	U4: 22,2	U4: 22,2	U4: 22,2	U4: 22,2	U4: 22,2
FL2				U2: 1,9	U2: 1,9	U2: 1,9	U2: 1,9
CG1							U2: 50,8
CG2	U2: 19,7						
CQ1					U5: 29,9	U5: 29,9	U5: 29,9
UD1		U3: 73,7	U3: 73,7	U3: 73,7			
MA1			U1: 72,0	U1: 72,0	U1: 72,0	U1: 72,0	U1: 72,0
TG1				U1: 57,8	U1: 57,8	U1: 57,8	U1: 57,8
AG1			U1: 150,0				
VR1	U3: 34,2	U3: 34,2	U3: 34,2				
VR2			U3: 68,0	U3: 68,0			
DE1						U5: 5,0	U5: 5,0
AC1					U5: 47,8	U5: 47,8	U5: 47,8
AC2	U5: 55,5	U5: 55,5					

APÊNDICE E

SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 4

Quadro 1E – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 4 no primeiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
AR1-U1	Rodovia	7.747,7	33.392,6	0,0	44, 59, 83, 87, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 98, 106
CN1-U1	Rodovia	1.415,8	8.537,6	0,0	64, 83, 92, 93, 94
PT2-U1	Rodovia	1.980,1	32.396,3	0,0	2, 6, 10, 26, 74
CG2-U2	Rodovia	1.015,0	6.120,3	0,0	28, 108
CA2-U3	Rodovia	5.939,0	107.378,3	0,0	3, 4, 7, 22, 29, 54, 80, 81, 82, 85, 102
CF2-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	0,0	8, 30, 52, 63, 76, 96, 97, 99, 103, 105, 107, 109
VR1-U3	Rodovia	3.402,6	29.297,0	0,0	5, 15, 16, 17, 18, 27, 47, 49
FN1-U4	Rodovia	8.640,0	81.820,8	0,0	14, 37, 38, 39, 57, 58, 66, 68, 69, 70, 75, 88
UB2-U5	Rodovia	6.829,9	141.106,0	0,0	33, 41, 43, 45, 46, 50, 55, 61, 62, 67, 71, 86
AC2-U5	Rodovia	8.640,0	111.542,4	0,0	19, 20, 21, 31, 32, 34, 35, 48, 51, 56, 100, 101
TOTAL		54.250,10	603.690,50	0,00	

Quadro 2E – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 4 no segundo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
CN1-U1	Rodovia	2.503,6	15.097,7	179,3	23, 42, 83, 91, 95, 106
PT2-U1	Rodovia	8.640,0	141.350,4	421,0	6, 9, 10, 24, 25, 26, 36, 53, 72, 77, 79, 84
CF2-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	1.711,7	3, 13, 14, 30, 39, 40, 54, 58, 78, 80, 81, 103
UD1-U3	Rodovia	1.906,6	29.552,7	177,2	2, 49, 55, 61, 62
VR1-U3	Rodovia	7.435,0	64.016,4	804,6	7, 15, 17, 18, 19, 21, 28, 29, 31, 32, 35, 47
FN1-U4	Rodovia	8.100,0	76.707,0	376,2	11, 12, 37, 57, 65, 66, 68, 69, 70, 97, 107
FL1-U4	Rodovia	1.252,1	8.627,1	33,4	63, 97
AC2-U5	Rodovia	6.928,0	89.440,8	390,7	4, 5, 20, 22, 33, 50, 56, 82, 100, 104
TOTAL		45.405,30	476.891,30	4.094,10	

Quadro 3E – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 4 no terceiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT2-U1	Rodovia	544,6	8.909,8	53,1	74, 90
AG1-EFBA	Rodovia	3.015,8	20.779,0	92,0	41, 51, 67, 73, 87, 94, 102
EFBA-EFAP	Ferrovia	3.015,8	51.932,3	-	-
CF2-U3	Rodovia	482,2	2.907,7	191,0	58, 59
UD1-U3	Rodovia	8.640,0	133.920,0	1.606,6	2, 24, 29, 31, 32, 35, 40, 47, 48, 60, 64, 88
VR1-U3	Rodovia	1.307,7	11.259,6	283,0	3, 18, 39, 61, 75, 93
VR2-U3	Rodovia	7.551,7	110.482,8	1.335,0	4, 5, 8, 14, 17, 33, 49, 56, 62, 99, 103, 105
FN1-U4	Rodovia	2.014,1	19.073,0	187,2	27, 80, 81, 92, 109
FL1-U4	Rodovia	8.153,9	56.179,7	174,0	12, 38, 43, 45, 46, 52, 54, 65, 96, 97, 98, 108
UB1-U5	Rodovia	169,9	1.316,8	60,1	7
CQ1-U5	Rodovia	2.166,7	16.792,1	396,3	22, 44, 85, 89, 110
TOTAL		34.046,60	433.552,80	4.378,30	

Quadro 4E – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 4 no quarto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	8.640,0	133.920,0	3.554,9	21, 34, 57, 68, 74, 76, 77, 78, 86, 90, 91, 104
TG1-U1	Rodovia	744,2	9.607,1	416,8	19, 87, 102
PL1-U2	Rodovia	668,9	9.785,7	168,2	20, 42
FL2-U2	Rodovia	5.228,8	18.039,3	872,6	9, 10, 11, 26, 39, 46, 61, 80, 81
CA1-U3	Rodovia	88,5	1.066,9	1,4	53
PJ1-U3	Rodovia	4.839,4	29.182,1	2.666,3	14, 20, 27, 28, 29, 50, 55, 69, 88, 92, 97, 98
UD1-U3	Rodovia	8.460,0	131.130,0	2.359,4	6, 8, 15, 16, 49, 56, 58, 60, 63, 70, 72, 99
VR2-U3	Rodovia	4.593,7	67.206,2	1.218,1	17, 25, 33, 37, 47, 48, 62, 72, 84, 100, 101
FL1-U4	Rodovia	8.640,0	59.529,6	138,2	13, 23, 30, 36, 38, 82, 83, 96, 106, 107, 108, 109
PL1-U4	Rodovia	360,0	5.266,8	90,5	20, 65
AC1-U5	Rodovia	88,0	985,0	13,7	66
TOTAL		42.351,50	465.718,70	11.500,10	

Quadro 5E – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 4 no quinto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	7.375,6	114.322,3	2.023,4	4, 43, 59, 67, 68, 76, 86, 87, 89, 91, 93, 105
TG1-U1	Rodovia	3.768,0	48.646,6	1.406,8	40, 51, 73, 102, 103, 104
PL1-U2	Rodovia	4.528,8	66.257,5	759,3	7, 11, 14, 27, 31, 38, 52, 65, 66, 75, 107
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	961,4	22, 46, 64, 80, 83, 85, 92, 94, 95, 96, 109, 110
CA1-U3	Rodovia	5.647,4	68.052,7	60,2	20, 25, 33, 37, 42, 45, 53, 54, 62, 71, 98, 101
CF1-U3	Rodovia	3.694,1	25.453,1	157,6	8, 9, 12, 16, 18, 29, 44, 81, 88
PJ1-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	3.173,3	6, 15, 17, 23, 26, 39, 55, 56, 63, 84, 99, 100
PL1-U4	Rodovia	3.931,2	57.512,3	659,1	7, 11, 14, 27, 31, 38, 52, 65, 66, 71, 75, 107
FL1-U4	Rodovia	6.236,8	42.971,0	66,5	2, 3, 10, 30, 32, 35, 50, 61, 82, 108
CQ1-U5	Rodovia	720,0	5.580,0	65,8	5
AC1-U5	Rodovia	1.080,0	12.085,2	111,9	24, 41
UB1-U5	Rodovia	360,0	2.790,0	63,6	41
TOTAL		54.621,90	525.577,90	9.508,90	

Quadro 6E – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 4 no sexto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	4.320,0	66.960,0	592,6	43, 47, 51, 67, 68, 73
TG1-U1	Rodovia	6.480,0	83.656,8	1.209,6	4, 70, 76, 89, 91, 97, 103, 104, 106
PL1-U2	Rodovia	3.582,7	52.416,2	300,4	11, 14, 42, 45, 46, 50, 65, 66, 80, 83, 96
PT1-U2	Rodovia	946,2	10.586,7	111,7	54, 87, 93, 105
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	480,5	7, 22, 26, 34, 44, 52, 61, 64, 77, 82, 88, 94
CA1-U3	Rodovia	203,0	2.446,2	1,1	71
CF1-U3	Rodovia	8.460,0	58.289,4	180,5	9, 12, 16, 20, 28, 63, 81, 84, 92, 101, 109, 110
PJ1-U3	Rodovia	7.560,0	45.586,8	1.388,5	3, 6, 8, 16, 17, 21, 24, 27, 30, 32, 42, 53
PT1-U3	Rodovia	1.758,7	16.655,2	207,7	54, 85, 87, 93, 95, 105
PL1-U4	Rodovia	4.877,3	71.353,6	408,9	11, 14, 31, 42, 45, 46, 50, 65, 66, 80, 83, 96
FL1-U4	Rodovia	5.290,7	36.452,4	28,2	2, 19, 35, 38, 55, 56, 107, 108
UB1-U5	Rodovia	1.620,0	12.555,0	143,2	41, 48, 49
CQ1-U5	Rodovia	6.480,0	50.220,0	296,3	5, 13, 57, 58, 60, 69, 72, 78, 79, 90
DE1-U5	Rodovia	681,5	2.351,1	97,1	58, 78
AC1-U5	Rodovia	7.740,0	86.610,6	401,2	15, 23, 25, 36, 37, 39, 41, 49, 74, 75, 98, 100
TOTAL		68.640,10	625.948,00	5.847,50	

Quadro 7E – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 4 no sétimo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	2.503,6	38.808,4	0,0	85, 87, 91, 106
TG1-U1	Rodovia	8.640,0	111.542,4	0,0	4, 47, 51, 67, 70, 73, 76, 89, 97, 99, 103, 104
PL1-U2	Rodovia	47,7	697,2		53
PT1-U2	Rodovia	3.466,3	38.787,4	0,0	7, 12, 16, 17, 34, 68, 77, 81, 84, 95
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	0,0	2, 22, 27, 31, 38, 54, 64, 92, 93, 101, 110
CG1-U2	Rodovia	1.015,0	12.230,4	0,0	28, 56
CF1-U3	Rodovia	5.608,0	38.639,1	0,0	6, 9, 20, 26, 32, 52, 63, 102, 105, 109
PJ1-U3	Rodovia	7.380,0	44.501,4	0,0	9, 19, 30, 32, 52, 55, 61, 65, 80, 83, 94
PT1-U3	Rodovia	4.993,7	47.290,8	0,0	7, 12, 16, 17, 20, 34, 43, 68, 77, 81, 84, 95
PL1-U4	Rodovia	8.592,3	125.706,0	0,0	11, 40, 44, 53, 62, 71, 74, 75, 96, 100, 107, 108
FL1-U4	Rodovia	1.575,5	10.855,2	0,0	42, 46, 82
UB1-U5	Rodovia	4.680,0	36.270,0	0,0	15, 23, 36, 39, 48, 57, 59, 69, 86, 98
CQ1-U5	Rodovia	5.940,0	46.035,0	0,0	5, 10, 18, 29, 33, 58, 60, 78, 79, 90
DE1-U5	Rodovia	6.480,0	22.356,0	0,0	10, 13, 18, 37, 41, 48, 49, 57, 59, 72, 90
AC1-U5	Rodovia	6.660,0	74.525,4	0,0	8, 14, 21, 24, 25, 36, 50, 66
TOTAL		76.222,10	678.052,70	0,0	

APÊNDICE F

SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 5

Quadro 1F – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 5 no primeiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	8.640,0	133.920,0	0,0	51, 52, 55, 56, 57, 77, 78, 79, 81, 86, 88, 89
TG1-U1	Rodovia	2.503,6	32.323,7	0,0	4, 11, 17, 22, 23, 46, 54, 63, 64, 74, 93, 95
VR2-U3	Rodovia	8.602,0	125.847,7	0,0	2, 3, 8, 12, 16, 24, 35, 36, 37, 40, 41, 47
AC2-U5	Rodovia	8.640,0	111.542,4	0,0	14, 26, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 42, 44, 62, 71
TOTAL		28.385,60	403.633,80	0,00	

Quadro 2F – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 5 no segundo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	7.535,9	116.807,1	476,5	6, 18, 20, 23, 30, 38, 43, 56, 72, 74, 83, 87
TG1-U1	Rodovia	3.607,7	46.577,1	41,3	10, 45, 46, 48, 52, 53, 54, 55, 57, 70, 81, 85
AC2-U5	Rodovia	2.386,0	30.803,4	3,6	15, 16, 24, 31, 36, 49, 94, 97, 98, 102, 103, 104
TOTAL		13.529,60	194.187,60	521,40	

Quadro 3F – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 5 no terceiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT2-U1	Rodovia	707,5	11.573,9	588,7	6, 72, 74, 81
TG1-U1	Rodovia	7.792,9	100.606,6	177,9	4, 5, 26, 45, 52, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89
CA2-U3	Rodovia	4.206,3	76.050,4	1.705,2	13, 19, 25, 31, 47, 50, 51, 66, 75, 76, 98, 106
CF2-U3	Rodovia	8.640,0	52.099,2	3.265,4	28, 29, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 69
PT1-U3	Rodovia	1.940,1	18.372,4	798,2	8, 17, 23, 30, 43, 73, 79, 90, 91, 100, 109
CQ1-U5	Rodovia	1.660,9	12.872,3	2.126,3	13, 21, 41, 58, 95, 103
TOTAL		24.947,70	271.574,80	8.661,70	

Quadro 4F – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 5 no quarto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT2-U1	Rodovia	2.160,0	35.337,6	1.348,0	84, 88, 110
AG1-EFBA	Rodovia	2.135,9	14.716,6	1.171,9	85, 89, 101
EFBA-EFAP	Ferrovias	2.135,9	36.780,9	0,0	-
CF2-U3	Rodovia	3.940,0	23.758,4	1.116,8	24, 36, 37, 38, 40, 42, 53, 56, 57, 61, 66, 67
UD1-U3	Rodovia	2.135,1	33.093,8	1.322,7	14, 62, 65, 78, 87, 97, 104
VR1-U3	Rodovia	5.939,2	51.136,8	2.240,1	22, 29, 30, 31, 32, 38, 91, 92, 93, 94, 107, 108
PT1-U3	Rodovia	5.967,3	56.511,2	1.841,6	7, 8, 23, 49, 59, 63, 68, 71, 72, 73, 74, 77
FL1-U4	Rodovia	6.455,7	44.479,6	3.763,3	2, 3, 9, 10, 11, 12, 33, 34, 35, 54, 55, 60
AC1-U5	Rodovia	1.486,0	16.628,5	1.348,6	15, 18, 20, 51, 76
DE1-U5	Rodovia	1.652,1	5.699,7	377,7	19, 58, 96, 98
CQ1-U5	Rodovia	2.700,0	20.925,0	2.592,3	95, 96, 99, 105
TOTAL		34.571,30	339.068,10	17.123,00	

Quadro 5F – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 5 no quinto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT2-U1	Rodovia	1.440,0	23.558,4	599,1	79, 88
CG2-U2	Rodovia	718,9	4.334,7	288,1	30, 77, 100, 110
PL1-U2	Rodovia	3.906,0	57.144,4	2.160,9	3, 5, 6, 11, 29, 38
FL2-U2	Rodovia	7.121,1	24.567,5	4.091,4	7, 16, 21, 30, 31, 33, 34, 49, 68, 92, 100, 106
UD1-U3	Rodovia	5.760,0	89.280,0	2.378,9	24, 37, 53, 64, 66, 78, 97, 107
CA1-U3	Rodovia	4.366,3	51.788,9	1.288,4	20, 23, 28, 36, 63, 71, 76, 80, 81, 83, 93, 104
PJ1-U3	Rodovia	5.367,9	32.369,1	3.558,7	15, 18, 22, 25, 26, 51, 52, 57, 60, 62, 87, 104
VR1-U3	Rodovia	2.487,4	21.416,2	625,4	14, 36, 44, 58, 59, 61, 62, 63, 69, 71
PL1-U4	Rodovia	1.326,0	19.397,6	733,5	3, 5, 6, 11, 29, 38
FL1-U4	Rodovia	8.640,0	59.529,6	3.357,6	17, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 50, 55, 56, 67, 70
CQ1-U5	Rodovia	2.880,0	22.320,0	1.843,4	86, 90, 98, 109
DE1-U5	Rodovia	1.440,0	4.968,0	219,4	94, 108
TOTAL		45.453,60	410.674,40	21.144,80	

Quadro 6F – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 5 no sexto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT2-U1	Rodovia	720,0	11.779,2	149,8	88
PL1-U2	Rodovia	6.148,8	89.958,1	1.700,8	10, 23, 25, 28, 35, 36, 41, 44, 45, 61, 62
FL2-U2	Rodovia	7.020,0	24.219,0	2.016,7	4, 12, 17, 19, 22, 56, 59, 60, 68, 77
VR1-U3	Rodovia	175,4	1.510,5	22,1	78
CF1-U3	Rodovia	6.480,0	44.647,2	2.207,2	14, 53, 58, 63, 64, 66, 81, 87, 92
PJ1-U3	Rodovia	8.100,0	48.843,0	2.684,7	2, 3, 8, 21, 28, 30, 34, 37, 40, 41, 42, 55
UD1-U3	Rodovia	3.226,2	50.007,7	666,2	52, 79, 97, 104, 107
FN1-U4	Rodovia	4.642,5	43.964,4	1.949,3	6, 7, 9, 11, 16, 18, 26, 32, 33, 39, 49
FL1-U4	Rodovia	5.525,4	38.069,6	1.073,8	7, 9, 16, 26, 29, 31, 38, 39, 49, 57, 67, 70
UB1-U5	Rodovia	1.597,3	12.378,8	152,2	98, 108, 109
CQ1-U5	Rodovia	11.160,0	460,9	0,0	86, 94
DE1-U5	Rodovia	540,0	1.863,0	41,2	98, 109
AC1-U5	Rodovia	2.700,0	30.213,0	816,8	5, 13, 69, 71
TOTAL		58.035,60	397.914,40	13.480,80	

Quadro 7F – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 5 no sétimo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT2-U1	Rodovia	2.880,0	47.116,8	0,0	53, 64, 87, 88
AR1-U1	Rodovia	5.487,2	23.650,2	0,0	24, 73, 74, 75, 85, 89, 91, 95, 96, 99, 101
CN1-U1	Rodovia	2.776,0	16.739,7	0,0	24, 46, 47, 54, 65, 74, 75, 82, 84, 85, 89
PL1-U2	Rodovia	4.482,3	65.577,1	0,0	3, 4, 6, 9, 21, 23, 26, 29, 31, 32, 33, 34
FL2-U2	Rodovia	7.920,0	27.324,0	0,0	11, 16, 40, 41, 44, 45, 59, 61, 62, 90
CG1-U2	Rodovia	718,9	8.662,2	0,0	66
UD1-U3	Rodovia	2.340,0	36.270,0	0,0	27, 52, 97, 100, 104, 106, 107, 110
CF1-U3	Rodovia	5.940,0	40.926,6	0,0	2, 8, 14, 58, 60, 63, 68, 77, 81, 92
PJ1-U3	Rodovia	6.660,0	40.159,8	0,0	2, 8, 14, 28, 33, 39, 57, 58, 67, 79
PL1-U3	Rodovia	2.924,4	42.785,0	0,0	4, 6, 9, 21, 23, 26, 32
FN1-U4	Rodovia	8.640,0	81.820,8	0,0	12, 17, 18, 19, 20, 22, 25, 30, 35, 36, 37, 38
PL1-U4	Rodovia	44,0	642,5	0,0	21, 33
FL1-U4	Rodovia	1.440,0	9.921,6	0,0	49, 56
UB1-U5	Rodovia	3.240,0	25.110,0	0,0	5, 13, 43, 50, 51, 71, 78, 80, 83, 94, 109
UB2-U5	Rodovia	4.837,3	99.938,0	0,0	27, 52, 76, 93, 97, 100, 104, 106, 107, 110
CQ1-U5	Rodovia	2.160,0	16.740,0	0,0	15, 86, 98
DE1-U5	Rodovia	1.440,0	4.968,0	0,0	78, 80, 109
AC1-U5	Rodovia	6.840,0	76.539,6	0,0	5, 10, 13, 42, 43, 50, 51, 55, 69, 71, 83, 108
TOTAL		70.770,10	664.891,90	0,0	

APÊNDICE G

SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 6

Quadro 1G – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 6 no primeiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	1.980,0	30.690,0	0,0	51, 86, 89, 90, 91, 95
TG1-U1	Rodovia	3.960,0	51.123,6	0,0	6, 9, 11, 16, 23, 69, 92, 93, 96
AR1-U1	Rodovia	360,0	1.551,6	0,0	56
CN1-U1	Rodovia	360,0	2.170,8	0,0	56
PT2-U1	Rodovia	1.440,0	23.558,4	0,0	58, 80
AG1-EFBA	Rodovia	540,0	3.720,6	0,0	62, 94
EFBA-EFAP	Ferrovias	540,0	9.298,8	0,0	
FL2-U2	Rodovia	5.940,0	20.493,0	0,0	25, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 59, 103
CG1-U2	Rodovia	246,0	2.965,1	0,0	54
CG2-U2	Rodovia	180,0	1.085,4	0,0	25
CA1-U3	Rodovia	900,0	10.845,0	0,0	50, 67
CA2-U3	Rodovia	1.260,0	22.780,8	0,0	13, 17, 34, 84
CF1-U3	Rodovia	3.595,4	24.772,6	0,0	12, 18, 63, 65, 70, 72, 74, 101, 109
PJ1-U3	Rodovia	5.580,0	33.647,4	0,0	14, 19, 47, 53, 63, 67, 68, 70, 71, 74, 77, 100
UD1-U3	Rodovia	900,0	13.950,0	0,0	2, 28, 46
VR1-U3	Rodovia	2.700,0	23.247,0	0,0	19, 50, 53, 60, 61, 66, 97, 100, 105, 108
PT1-U3	Rodovia	1.620,0	15.341,4	0,0	7, 12, 72, 101
FN1-U4	Rodovia	3.240,0	30.682,8	0,0	5, 10, 30, 36, 38, 49, 52, 57, 78, 81, 82
FL1-U4	Rodovia	5.760,0	39.686,4	0,0	5, 10, 15, 30, 38, 49, 78, 79, 82, 83, 87, 88
AC1-U5	Rodovia	3.600,0	40.284,0	0,0	4, 8, 26, 32, 48, 75, 98, 99, 102, 104
AC2-U5	Rodovia	3.600,0	46.476,0	0,0	13, 17, 22, 26, 27, 48, 75, 84, 104, 110
DE1-U5	Rodovia	1.736,2	5.989,9	0,0	3, 21, 24, 31, 76
CQ1-U5	Rodovia	3.240,0	25.110,0	0,0	3, 20, 21, 24, 29, 31, 33, 35, 64, 76, 107
UB1-U5	Rodovia	1.260,0	9.765,0	0,0	99, 102, 106
UB2-U5	Rodovia	1.440,0	29.750,4	0,0	2, 28, 46, 85
TOTAL		55.977,60	518.986,00	0,00	

Quadro 2G – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 6 no segundo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	2.700,0	41.850,0	24,8	16, 56, 58, 73, 96
TG1-U1	Rodovia	799,5	10.323,1	12,2	62, 95
AR1-U1	Rodovia	1.518,3	6.544,0	8,1	51, 91, 92, 93
CN1-U1	Rodovia	540,0	3.256,2	0,8	51
PT2-U1	Rodovia	720,0	11.779,2	8,2	23
PL1-U2	Rodovia	180,0	2.633,4	0,0	110
CG2-U2	Rodovia	66,0	398,4	1,0	81
FL2-U2	Rodovia	1.440,0	4.968,0	20,9	81, 88, 97
CA1-U3	Rodovia	539,9	6.505,3	5,3	48, 50, 72
VR2-U3	Rodovia	1.800,0	26.334,0	1,4	27, 28, 46, 60
CF1-U3	Rodovia	710,8	4.897,4	13,5	45, 77
PJ1-U3	Rodovia	1.310,0	7.899,1	45,9	7, 10, 15, 37, 70, 75
UD1-U3	Rodovia	3.600,0	55.800,0	33,0	2, 28, 47, 55, 60, 63, 65, 66, 74, 85, 105
VR1-U3	Rodovia	244,5	2.105,5	5,6	26
PT1-U3	Rodovia	900,0	8.523,0	11,7	40, 45, 67, 80, 100
PL1-U4	Rodovia	180,0	2.633,4	0,0	110
FN1-U4	Rodovia	1.306,7	12.374,4	36,8	25, 30, 59, 68, 71
FL1-U4	Rodovia	1.791,6	12.344,5	51,9	25, 30, 54, 59
AC1-U5	Rodovia	174,3	1.950,2	4,3	108
AC2-U5	Rodovia	174,3	2.250,0	3,1	31
CQ1-U5	Rodovia	180,0	1.395,0	4,8	106
TOTAL		20.875,90	226.764,10	293,30	

Quadro 3G – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 6 no terceiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	857,1	13.285,7	15,7	29, 57, 58
CN1-U1	Rodovia	50,3	303,1	0,2	38
PT2-U1	Rodovia	546,8	8.945,3	12,5	16, 100
AG1-EFBA	Rodovia	191,1	1.317,0	4,4	5
EFBA-EFAP	Ferrovial	191,1	3.291,6	0,0	
FL2-U2	Rodovia	171,6	592,2	5,0	10
PL1-U2	Rodovia	360,0	5.266,8	0,0	49, 102
PL1-U3	Rodovia	180,0	2.633,4	0,0	102
CA2-U3	Rodovia	179,9	3.251,8	11,5	6
UD1-U3	Rodovia	107,9	1.672,9	2,0	7
VR2-U3	Rodovia	1.144,5	16.744,6	1,7	12, 33, 61, 64
PT1-U3	Rodovia	186,8	1.768,8	4,8	73
PL1-U4	Rodovia	540,0	7.900,2	0,0	49, 110
CQ1-U5	Rodovia	290,9	2.254,7	15,5	31
UB1-U5	Rodovia	395,8	3.067,7	12,1	11, 109
TOTAL		5.202,7	72.295,80	85,40	

Quadro 4G – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 6 no quarto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PL1-U2	Rodovia	720,0	10.533,6	0,0	19, 25, 62
PL1-U3	Rodovia	360,0	5.266,8	0,0	24, 25
PL1-U4	Rodovia	360,0	5.266,8	0,0	110
UB2-U5	Rodovia	215,8	4.459,1	12,8	44, 85
TOTAL		1.655,80	25.526,30	12,80	

Quadro 5G – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 6 no quinto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PL1-U2	Rodovia	720,0	10.533,6	0,0	52, 84, 110
PL1-U4	Rodovia	360,0	5.266,8	0,0	110
TOTAL		1.080,00	15.800,40	0,0	

Quadro 6G – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 6 no sexto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PL1-U2	Rodovia	540,0	7.900,2	0,0	60, 62, 110
PL1-U4	Rodovia	360,0	5.266,8	0,0	110
TOTAL		900,00	13.167,00	0,0	

Quadro 7G – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 6 no sétimo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PL1-U2	Rodovia	686,2	10.038,5	0,0	22, 62, 90, 110
CF2-U3	Rodovia	4.306,2	25.966,6	0,0	7, 16, 17, 71, 90, 103, 104, 105, 106, 109
PL1-U4	Rodovia	900,0	13.167,0	0,0	31, 53, 110
TOTAL		5.892,40	49.172,10	12,80	

APÊNDICE H

SOLUÇÕES GERADAS PELO SOFTWARE CPLEX NO CENÁRIO 7

Quadro 1H – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 7 no primeiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
AR1-U1	Rodovia	7.740,0	33.359,4	0,0	62, 67, 70, 71, 72, 74, 88, 92, 94, 95, 98, 108
CN1-U1	Rodovia	3.403,6	20.524,7	0,0	8, 28, 72, 73, 88, 89, 92
PT1-U2	Rodovia	4.412,3	49.374,1	0,0	15, 16, 17, 27, 29, 37, 40, 43, 52, 90, 110
CG2-U2	Rodovia	1.015,0	6.120,3	0,0	29, 103, 110
CF1-U3	Rodovia	8.640,0	59.529,6	0,0	9, 10, 19, 32, 35, 42, 45, 46, 47, 53, 65, 96
UD1-U3	Rodovia	8.640,0	133.920,0	0,0	6, 11, 18, 24, 30, 36, 49, 55, 60, 83, 84, 87
PT1-U3	Rodovia	701,6	6.645,5	0,0	15, 27, 29, 43
FN1-U4	Rodovia	8.640,0	81.820,8	0,0	3, 7, 12, 13, 25, 26, 34, 41, 54, 59, 61, 63
DE1-U5	Rodovia	7.020,0	24.219,0	0,0	23, 31, 33, 57, 76, 77, 82, 91, 99, 100, 105, 109
CQ1-U5	Rodovia	8.100,0	62.775,0	0,0	2, 21, 22, 38, 39, 66, 76, 78, 80, 93, 97, 105
UB1-U5	Rodovia	6.829,9	52.931,8	0,0	31, 48, 57, 58, 68, 69, 79, 81, 104, 106, 107, 109
TOTAL		65.142,40	531.220,20	0,00	

Quadro 2H – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 7 no segundo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
CN1-U1	Rodovia	515,9	3.110,6	455,2	4
PT2-U1	Rodovia	1.485,2	24.298,1	1.080,8	6, 16, 49, 53
AR1-U1	Rodovia	7,7	33,2	10,1	4
AG1-EFBA	Rodovia	3.015,8	20.779,0	1.162,8	14, 44, 56, 75, 102
EFBA-EFAP	Ferrovias	3.015,8	51.932,3	0,0	
UD1-U3	Rodovia	8.640,0	133.920,0	3.140,6	9, 11, 19, 20, 24, 30, 32, 36, 45, 47, 83, 84
VR1-U3	Rodovia	623,2	5.366,3	123,0	17, 37, 91
PT1-U3	Rodovia	78,5	743,2	24,4	27
CF1-U3	Rodovia	8.640,0	59.529,6	5.786,9	10, 18, 40, 42, 43, 46, 51, 52, 60, 85, 90, 110
FN1-U4	Rodovia	8.640,0	81.820,8	12.733,0	3, 5, 7, 12, 13, 26, 41, 54, 59, 64, 86, 103
CQ1-U5	Rodovia	7.206,7	55.852,1	10.378,9	2, 31, 33, 57, 68, 69, 78, 80, 82, 93, 104, 105
DE1-U5	Rodovia	141,5	488,1	24,5	21
TOTAL		38.994,50	437.873,30	34.920,20	

Quadro 3H – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 7 no terceiro dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
PT2-U1	Rodovia	8.640,0	141.350,4	5.029,9	8, 16, 30, 38, 42, 45, 46, 55, 76, 81, 100, 109
FL2-U2	Rodovia	4.210,3	14.525,5	500,6	12, 22, 54, 63, 65, 71, 94, 95, 96, 97, 98
CF1-U3	Rodovia	482,2	3.322,4	646,0	6, 43, 49, 61
UD1-U3	Rodovia	1.726,6	26.762,7	1.255,2	15, 36, 37, 62
PT1-U3	Rodovia	5.972,2	56.557,3	3.713,4	6, 34, 35, 39, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 60, 77
VR1-U3	Rodovia	8.640,0	74.390,4	3.410,4	19, 21, 23, 27, 29, 32, 47, 73, 79, 84, 85, 89
VR2-U3	Rodovia	1.160,6	16.980,2	258,2	15, 40, 92, 101
FN1-U4	Rodovia	1.474,0	13.959,2	4.344,6	7, 28, 74, 87, 106
TOTAL		32.305,90	347.848,10	19.158,30	

Quadro 4H – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 7 no quarto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	1.464,1	22.694,5	1.864,3	51, 52, 58, 64, 67, 68, 77
TG1-U1	Rodovia	8.640,0	111.542,4	9.658,1	9, 38, 56, 57, 69, 76, 78, 83, 104, 108, 109, 110
PT2-U1	Rodovia	1.039,6	17.008,0	453,9	3, 4, 8, 16, 31
PL1-U2	Rodovia	1.568,9	22.952,7	2.711,4	19, 20, 28, 47, 70, 75, 85, 103, 105
FL2-U2	Rodovia	8.640,0	29.808,0	770,4	7, 13, 21, 23, 27, 34, 72, 73, 82, 84, 91, 98
VR1-U3	Rodovia	2.882,3	24.816,3	1.706,5	2, 12, 29, 35, 44, 53, 54, 61, 99
VR2-U3	Rodovia	8.640,0	126.403,2	1.441,9	6, 37, 39, 40, 41, 79, 80, 86, 88, 89, 92, 93
PJ1-U3	Rodovia	6.459,4	38.950,7	6.925,3	10, 12, 15, 17, 18, 26, 35, 36, 43, 48, 49, 53
PL1-U4	Rodovia	720,0	10.533,6	1.244,3	19, 20, 71
FL1-U4	Rodovia	5.228,8	36.026,2	14.845,6	5, 11, 14, 22, 24, 25, 59, 63, 66, 90, 94, 96
TOTAL		45.283,10	440.735,60	41.621,70	

Quadro 5H – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 7 no quinto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	5.535,2	85.796,3	4.698,8	9, 38, 51, 52, 56, 64, 76, 108, 109
TG1-U1	Rodovia	5.608,4	72.406,1	4.179,6	8, 57, 58, 62, 65, 67, 69, 78, 83, 110
PL1-U2	Rodovia	6.932,0	101.417,5	7.987,0	11, 14, 19, 21, 46, 60, 61, 63, 81, 94, 98, 105
FL2-U2	Rodovia	6.236,8	21.516,7	370,7	18, 22, 30, 32, 36, 42, 45, 55, 59, 66, 74, 95
CA1-U3	Rodovia	4.499,1	54.213,8	2.715,2	6, 15, 20, 29, 37, 41, 79, 93, 100, 103, 106
VR2-U3	Rodovia	1.840,5	26.926,0	204,8	35, 50, 86, 89, 102
CF2-U3	Rodovia	3.542,1	21.359,5	4.259,3	27, 28, 53, 54, 61, 70, 72, 73, 80, 84, 90
PJ1-U3	Rodovia	8.100,0	48.843,0	5.789,7	2, 7, 10, 17, 20, 23, 24, 33, 39, 40, 44, 88
PL1-U4	Rodovia	1.528,0	22.352,3	1.760,3	11, 14, 19, 63, 81, 98, 105
FL1-U4	Rodovia	8.640,0	59.529,6	16.354,1	5, 25, 26, 34, 47, 48, 71, 75, 82, 85, 97, 101
AC1-U5	Rodovia	448,0	5.013,4	30,7	43, 87
AC2-U5	Rodovia	1.348,0	17.403,0	8,2	12, 43, 49, 87
TOTAL		54.258,10	536.777,20	48.358,40	

Quadro 6H – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 7 no sexto dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	7.200,0	111.600,0	3.056,0	38, 51, 57, 58, 67, 69, 78, 92, 108, 109
TG1-U1	Rodovia	2.880,0	37.180,8	1.073,0	8, 62, 76, 110
PL1-U2	Rodovia	7.260,4	106.221,4	4.182,5	14, 36, 37, 41, 42, 66, 68, 73, 74, 80, 94, 100
FL2-U2	Rodovia	5.760,0	19.872,0	171,2	3, 4, 5, 26, 40, 88, 104, 107
CA1-U3	Rodovia	720,0	8.676,0	217,3	102
CA2-U3	Rodovia	2.177,3	39.366,1	1.129,9	10, 46, 49, 54, 99
VR2-U3	Rodovia	504,4	7.379,6	28,1	53, 93
CF1-U3	Rodovia	7.020,0	42.330,6	4.220,6	18, 28, 30, 32, 50, 55, 68, 70, 90, 97, 101, 106
PJ1-U3	Rodovia	7.560,0	45.586,8	2.701,9	2, 33, 44, 45, 50, 55, 72, 77, 81, 89, 101, 105
PL1-U4	Rodovia	1.199,6	17.548,4	691,0	14, 36, 41, 42, 66
FL1-U4	Rodovia	8.640,0	59.529,6	8.176,8	27, 34, 48, 59, 60, 61, 63, 71, 75, 84, 96, 98
UB2-U5	Rodovia	349,9	7.229,2	16,0	91
AC1-U5	Rodovia	7.380,0	82.582,2	253,0	7, 11, 12, 19, 20, 24, 29, 39, 43, 79, 87, 103
AC2-U5	Rodovia	7.740,0	99.923,4	23,7	6, 13, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 31, 35, 43
TOTAL		66.391,60	685.026,10	25.941,00	

Quadro 7H – Modal utilizado, volume de cana transportado, grupo de colheita selecionado, custo de transporte e custo de penalidade no trecho canavial-usina pelo cenário 7 no sétimo dia de operação

Trecho	Modal	Volume transportado (t)	Custo de transporte (R\$)	Custo da penalidade (R\$)	Grupo de Colheita
MA1-U1	Rodovia	8.640,0	133.920,0	0,0	8, 25, 38, 47, 51, 57, 62, 67, 76, 78, 82, 108
TG1-U1	Rodovia	2.503,6	32.323,7	0,0	22, 69, 92, 109, 110
PL1-U2	Rodovia	5.852,0	85.617,1	0,0	20, 33, 39, 54, 55, 65, 68, 71, 100, 102, 103, 107
FL2-U2	Rodovia	6.301,8	21.741,0	0,0	4, 5, 26, 28, 36, 44, 45, 66, 88, 94, 97
CG1-U2	Rodovia	1.015,0	12.230,4	0,0	75, 98
CA1-U3	Rodovia	720,0	8.676,0	0,0	43
CA2-U3	Rodovia	3.761,6	68.012,2	0,0	2, 11, 23, 24, 35, 41, 95, 106
CF2-U3	Rodovia	7.200,0	43.416,0	0,0	3, 10, 14, 27, 34, 60, 63, 65, 77, 83, 90, 102
PJ1-U3	Rodovia	6.300,0	37.989,0	0,0	3, 29, 30, 39, 49, 50, 55, 71, 74, 90, 96, 104
PL1-U4	Rodovia	1.528,0	22.352,3	0,0	20, 33, 54, 55, 65, 68, 100, 102, 103, 107
FL1-U4	Rodovia	8.640,0	59.529,6	0,0	18, 32, 37, 40, 48, 59, 61, 70, 72, 81, 84, 101
UB2-U5	Rodovia	6.480,0	133.876,8	0,0	6, 16, 21, 53, 56, 85, 86, 91, 93
AC1-U5	Rodovia	7.740,0	86.610,6	0,0	9, 15, 17, 19, 31, 64, 79, 80, 87, 89, 99, 105
AC2-U5	Rodovia	6.480,0	83.656,8	0,0	2, 7, 12, 13, 19, 42, 46, 52, 73, 80, 87
TOTAL		73.162,00	829.951,50	0,00	