



## LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE CENTROS DE INTEGRAÇÃO LOGÍSTICA CONSIDERANDO CRITÉRIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Vanessa de Almeida Guimarães

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Rio de Janeiro  
Outubro de 2019

LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE CENTROS DE INTEGRAÇÃO LOGÍSTICA  
CONSIDERANDO CRITÉRIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Vanessa de Almeida Guimarães

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

---

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

---

Prof. Geraldo Regis Mauri, D.Sc.

---

Prof. Gisele de Lorena Diniz Chaves, D.Sc.

---

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

---

Prof. Pedro Henrique González Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
OUTUBRO DE 2019

Guimarães, Vanessa de Almeida

Localização-alocação de centros de integração logística considerando critérios econômicos e ambientais/Vanessa de Almeida Guimarães. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVII, 235 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 137 – 164.

1. Transporte. 2. Otimização. 3. Meio Ambiente.  
I. Ribeiro, Glaydston Mattos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*Aos meus amados pais, Roni e  
Cristina, maiores incentivadores,  
por me ensinarem que apenas a  
educação liberta. Ao meu irmão  
Hugo, parceiro de vida.*

# Agradecimentos

A Deus, pela força e sustento. A minha amada família, base de tudo. Ao professor Glaydston Mattos Ribeiro, pelo incentivo, pela paciência e pelos conhecimentos partilhados. Ao Pedro Henrique González, parceiro fundamental no desenvolvimento desta tese, por todas as segundas-feiras dedicadas a dar suporte a esta pesquisa. Ao André Macedo, que dedicou seu tempo para me salvar com o LaTeX. Ao Maxwell de Azevedo, com suas dicas sobre a utilização do *software* de pesquisa cientométrica. Aos meus queridos ex-professores e, hoje, meus colegas de profissão. Em especial: a Ana Paula Todaro que me deu a primeira oportunidade acadêmica, com uma bolsa de extensão logo no primeiro ano de graduação; ao Cristiano Fonseca Monteiro, meu orientador de iniciação científica que, embora de uma área completamente diversa da atual, ensinou-me o bê-a-bá científico e sempre me incentivou a carreira acadêmica (e ao café!); ao Ilton Curty Leal Junior, grande incentivador, que confiou a mim projetos de pesquisa relevantes, compartilhou conhecimentos e deu um suporte muito importante no início da carreira. Aos queridos amigos que a vida me presenteou, por todo apoio e paciência. Aos colegas do Lab-GIS OTM, que tive a oportunidade que conhecer e compartilhar a rotina. Aos professores do PET, por todo aprendizado. Ao Ministério da Infraestrutura, pela oportunidade de ter participado do Projeto CIL, que fomentou todo o desenvolvimento da presente tese. A Capes, pela bolsa de estudos concedida. Ao CEFET/RJ pela possibilidade de fazer este doutorado em concomitância com as atividades docente. Aos professores que compõem a banca, na certeza das excelentes contribuições que serão feitas para aprimoramento da tese. Àqueles que não estão nomeados mas que, de alguma forma, estiveram presentes e torceram pelo sucesso desta pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## LOCALIZAÇÃO-ALOCAÇÃO DE CENTROS DE INTEGRAÇÃO LOGÍSTICA CONSIDERANDO CRITÉRIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Vanessa de Almeida Guimarães

Outubro/2019

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

Incorporar os aspectos ambientais às formulações matemáticas de localização de facilidades é um desafio, dada a falta de consenso e a dificuldade de mensurá-los. A pesquisa cientométrica feita nesta tese indicou que apenas 2% dos *papers* publicados na base de dados *Web of Science* lidam, ainda que indiretamente, com a dimensão ambiental nos processos de localização, sendo que nenhum deles tem viés de suporte ao planejamento governamental. Desta maneira, o objetivo principal deste trabalho é propor uma modelagem matemática para localização-alocação de centros de integração logística - CILs que considere critérios econômicos e ambientais. Foram estabelecidos pesos ( $\alpha$  e  $\beta$ ) às dimensões econômica (custo logístico) e ambiental (emissão de CO<sub>2</sub>), visando avaliar políticas governamentais que dessem diferentes ênfases a cada uma delas. O modelo foi aplicado considerando quatro produtos relevantes para a matriz econômica brasileira (soja, farelo de soja, açúcar e milho) e as bases de dados georreferenciadas do Plano Nacional de Logística e Transporte, projetadas para o ano de 2031. Verificou-se que, na rede investigada, os custos logísticos têm maior influência na definição das regiões ótimas, por conta da diferença de magnitude em relação ao custo de emissão. Além disso, a combinação das políticas de regulamentação de carbono *carbon cap* e *carbon tax* teriam resultados mais eficazes do que sua aplicação isolada. Por fim, caso nenhuma facilidade fosse aberta o custo total da rede seria 2,8 vezes superior ao valor do cenário referencial. Dessa forma, pode-se afirmar que o modelo proposto seria útil como ferramenta de apoio ao planejamento estratégico governamental, indicando os locais ideais para implantação de CILs considerando os custos logístico e de emissão de CO<sub>2</sub> no processo decisório.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

LOCATION-ALLOCATION OF LOGISTICS INTEGRATION CENTERS  
CONSIDERING ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL CRITERIA

Vanessa de Almeida Guimarães

October/2019

Advisor: Glaydston Mattos Ribeiro

Department: Transportation Engineering

Incorporating environmental aspects to the mathematical formulations of facility location is a challenge, due to the lack of consensus and the difficult in measuring them. The scientometric research performed in this thesis indicated that only 2% of the papers published in the *Web of Science* database deal, albeit indirectly, with the environmental dimension in location processes, highlighting that none of them have bias in support of government planning. Therefore, the main objective of this work is to propose a mathematical model for location-allocation of logistics integration centers - LICs that considers economic and environmental criteria. Weights ( $\alpha$  and  $\beta$ ) were set on economic (logistics cost) and environmental (CO<sub>2</sub> emission) dimensions that composes this model, aiming to evaluate governmental policies given different emphazys to each of them. The proposed model was applied considering four relevant products of the Brazilian economic matrix (soybean, soybean meal, sugar and corn) and the georeferenced databases of the National Logistics and Transport Plan, projected for the year 2031. It was found that the logistics costs have a greater influence on the definition of optimal location in the investigated network, due to the difference of magnitude in relation to the emission cost. Besides, a combination of the cabon cap and carbon tax policies would lead to more effective results than their isolated application. Finally, if no facility were opened, the total cost of the network would be 2.8 times higher than that registered in the base scenario. Therefore, the proposed model would be useful as a support tool for government strategic planning, indicating the ideal locations for LICs implementation considering both the logistics and the CO<sub>2</sub> emission costs in the decision making process.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Panorama sobre o tema localização de facilidades</b>	<b>8</b>
2.1 Estudo cientométrico da produção científica internacional sobre localização de facilidades . . . . .	11
2.2 Considerações preliminares sobre a produção científica de localização de facilidades e meio ambiente . . . . .	29
<b>3 Modelagem matemática sobre localização de facilidades e meio ambiente</b>	<b>32</b>
3.1 Mapeamento da literatura sobre localização de facilidades e meio ambiente . . . . .	38
3.2 Abordagens do aspecto ambiental nas modelagens matemáticas sobre localização de facilidades . . . . .	53
3.2.1 Abordagem indireta do aspecto ambiental . . . . .	54
3.2.2 Adoção da ACV . . . . .	55
3.2.3 Abordagem sustentável . . . . .	56
3.2.4 Emissão de carbono e políticas regulatórias . . . . .	58
<b>4 Modelagem matemática para localização-alocação de CILs considerando critérios econômicos e ambientais</b>	<b>64</b>
4.1 Modelo de Guimarães et al. (2015) . . . . .	65
4.2 Modelo matemático proposto . . . . .	71
<b>5 Parâmetros do estudo de caso</b>	<b>75</b>
5.1 Zoneamento do território brasileiro . . . . .	75
5.2 Produtos selecionados e matrizes O/D . . . . .	77



5.3	Redes de transporte . . . . .	80
5.4	Candidatos a CIL . . . . .	82
5.5	Custos logísticos . . . . .	84
5.6	Emissão de carbono . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Aplicação do modelo matemático proposto</b>	<b>87</b>
6.1	Análise dos resultados . . . . .	89
6.1.1	Aplicação: Cenário referencial . . . . .	89
6.1.2	Aplicação: Cenários pessimista e otimista . . . . .	104
6.1.3	Aplicação: Análise de sensibilidade - variação dos pesos de $\alpha$ e $\beta$ . . . . .	107
6.1.4	Aplicação: Política <i>carbon cap</i> . . . . .	113
6.1.5	Aplicação: Adoção simultânea das políticas <i>carbon cap</i> e <i>car-</i> <i>bon tax</i> . . . . .	114
6.1.6	Aplicação: Política <i>carbon tax</i> mais restritiva . . . . .	116
6.1.7	Aplicação: Cenário com custo de abertura dos CILs associado à política <i>carbon tax</i> e <i>carbon cap</i> . . . . .	120
6.1.8	Aplicação: Definição da quantidade máxima de CILs a serem abertos - similar ao problema de p-medianas . . . . .	123
6.2	Comparação dos cenários . . . . .	128
<b>7</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>132</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>137</b>
<b>A</b>	<b>Trabalhos sobre localização de facilidades e meio ambiente</b>	<b>165</b>
<b>B</b>	<b>Detalhamento dos modelos matemáticos selecionados sobre loca-</b> <b>lização de facilidades e meio ambiente</b>	<b>176</b>
B.1	Modelo de Afshari et al. (2014) . . . . .	176
B.2	Modelo de Bojarski et al. (2009) . . . . .	180
B.3	Modelo de Brandenburg (2015) . . . . .	187
B.4	Modelo de Fahimnia e Jabbarzadeh (2016) . . . . .	193
B.5	Modelo de Garg et al. (2015) . . . . .	198
B.6	Modelo de Santibañez-Aguilar et al. (2014) . . . . .	206
B.7	Modelo de Fareeduddin et al. (2015) . . . . .	218
<b>C</b>	<b>Grupos de produtos estabelecidos no PNLT</b>	<b>227</b>
<b>D</b>	<b>Matriz O/D dos quatro produtos selecionados consolidada por</b> <b>região do IBGE</b>	<b>230</b>



# Lista de Figuras

2.1	Etapas da pesquisa cientométrica . . . . .	12
2.2	Evolução das publicações sobre localização de facilidades . . . . .	14
2.3	Redes de relacionamento dos principais autores que publicam sobre o tema . . . . .	18
2.4	Evolução das publicações das principais áreas a cada ano . . . . .	20
2.5	Principais palavras-chave nas publicações internacionais . . . . .	25
2.6	Evolução das publicações sobre meio ambiente a cada ano . . . . .	30
4.1	Representação de uma possível rede de transportes estabelecida entre os pares O/D . . . . .	67
5.1	Zoneamento do território brasileiro - PNLT . . . . .	76
5.2	Distribuição geográfica da produção e do consumo de soja previstos para 2031 . . . . .	78
5.3	Distribuição geográfica da produção e do consumo de farelo de soja previstos para 2031 . . . . .	79
5.4	Distribuição geográfica da produção e do consumo de milho previstos para 2031 . . . . .	79
5.5	Distribuição geográfica da produção e do consumo de açúcar previstos para 2031 . . . . .	80
5.6	Rede multimodal do PNLT . . . . .	81
5.7	Microrregiões candidatas a localização de CILs . . . . .	83
6.1	CILs habilitados no cenário referencial . . . . .	90
6.2	Relação entre custo logístico e de CO <sub>2</sub> na composição do custo total .	91
6.3	Relação entre custo logístico e de CO <sub>2</sub> de cada CIL habilitado . . . . .	94
6.4	Relação entre custo logístico e de CO <sub>2</sub> dos CILs habilitados com, pelo menos, 2 milhões de toneladas . . . . .	95
6.5	CILs habilitados por região (Cenário 01) . . . . .	96
6.6	CILs habilitados com mais de 2 milhões de toneladas e respectivos produtos movimentados . . . . .	97
6.7	Distribuição das cargas movimentadas diretamente e por meio de CILs	98

6.8	Distribuição das cargas movimentadas por meio de CILs . . . . .	98
6.9	Distribuição das cargas movimentadas diretamente e por meio de CILs	105
6.10	Distribuição dos custos totais nos cenários pessimista, referencial e otimista . . . . .	106
6.11	Relação entre o custo logístico e de emissão nos cenários pessimista, referencial e otimista . . . . .	106
6.12	Variação dos custos totais e dos volumes movimentados por CIL, considerando diferentes pesos atribuídos à função objetivo . . . . .	109
6.13	Comparação entre os CILs habilitados no cenário referencial e no ambiental ( $\alpha = 0$ e $\beta = 1$ ) . . . . .	110
6.14	Proporção o custo logístico e de emissão de carbono na composição do custo total, considerando diferentes pesos atribuídos à função objetivo	111
6.15	Relação entre o custo logístico, de emissão e número de CILs abertos considerando diferentes pesos atribuídos à função objetivo . . . . .	112
6.16	Emissão de carbono considerando os diferentes pesos atribuídos à Função Objetivo . . . . .	113
6.17	Distribuição espacial dos CILs habilitados no cenário referencial, con- siderando diferentes valores de $C_c$ . . . . .	117
6.18	Relação entre os custos logísticos e $\text{CO}_2$ na composição do custo total para diferentes valores atribuídos ao $C_c$ no cenário referencial . . . . .	118
6.19	Emissão de $\text{CO}_2$ com variação do $C_c$ no cenário referencial . . . . .	119
6.20	Relação entre os custos logísticos e de emissão na composição do custo total, considerando diferentes valores de $g_k$ . . . . .	121
6.21	Emissão de carbono considerando diferentes custos de abertura do CIL e a política <i>carbon cap</i> . . . . .	122
6.22	Relação entre o custo total e os volume movimentado para cada $\bar{p}$ . . . . .	123
6.23	Distribuição dos CILs habilitados por região, considerando $\bar{p} = 45$ e os cenários econômico, referencial e ambiental . . . . .	126
6.24	Emissão de $\text{CO}_2$ com a variação do número de CILs habilitados . . . . .	127

# Lista de Tabelas

2.1	Artigos que apresentam <i>surveys</i> sobre modelos de localização de facilidades . . . . .	10
2.2	Definição da estratégia de busca . . . . .	12
2.3	Indicadores cientométricos . . . . .	13
2.4	Principais autores da área (com volume de publicação de, pelo menos, 24 papers) . . . . .	15
2.5	Quinze principais organizações em volume de publicação . . . . .	16
2.6	Países com maior volume de publicação sobre o tema . . . . .	17
2.7	Principais áreas de interesse pelo tema localização de facilidades . . . . .	19
2.8	Principais <i>journals</i> que publicam sobre o tema localização de facilidades . . . . .	21
2.9	Quinze artigos mais citados na área . . . . .	22
2.10	Palavras-chave relacionadas à dimensão ambiental . . . . .	26
3.1	Impactos ambientais relacionados à localização de facilidades e ações de mitigação encontradas na literatura . . . . .	35
3.2	Análise dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis - recorte . . . . .	40
3.3	Caracterização dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis . . . . .	45
3.4	Objetivos dos modelos matemáticos selecionados . . . . .	50
3.5	Tratamento do aspecto ambiental nos modelos matemáticos . . . . .	51
3.6	Tipos de facilidades investigadas nos trabalhos analisados . . . . .	52
3.6	Tipos de facilidades investigadas nos trabalhos analisados . . . . .	53
3.7	Tratamento dado ao CO <sub>2</sub> nos artigos levantados . . . . .	59
3.7	Tratamento dado ao CO <sub>2</sub> nos artigos levantados . . . . .	60
3.7	Tratamento dado ao CO <sub>2</sub> nos artigos levantados . . . . .	61
5.1	Fatores de emissão de carbono encontrados na literatura (em gCO <sub>2</sub> /tkm) . . . . .	85
6.1	Tempos computacionais de solução de cada cenário . . . . .	88

6.2	CILs habilitados no cenário médio com pesos iguais ( $\alpha = 0,5$ e $\beta = 0,5$ ) . . . . .	91
6.2	CILs habilitados no cenário médio com pesos iguais ( $\alpha = 0,5$ e $\beta = 0,5$ ) . . . . .	92
6.2	CILs habilitados no cenário médio com pesos iguais ( $\alpha = 0,5$ e $\beta = 0,5$ ) . . . . .	93
6.3	Distribuição das cargas movimentadas por cada CIL habilitado . . . . .	99
6.3	Distribuição das cargas movimentadas por cada CIL habilitado . . . . .	100
6.3	Distribuição das cargas movimentadas por cada CIL habilitado . . . . .	101
6.3	Distribuição das cargas movimentadas por cada CIL habilitado . . . . .	102
6.4	Variação dos resultados em função dos pesos adotados na Função Objetivo . . . . .	108
6.5	Resultados dos cenários econômico, referencial e ambiental considerando $\bar{p} = 45$ . . . . .	125
6.6	Comparação dos resultados totais dos diferentes cenários em relação ao referencial . . . . .	129
6.6	Comparação dos resultados totais dos diferentes cenários em relação ao referencial . . . . .	130
A.1	Localização de facilidade e meio ambiente . . . . .	166
C.1	Grupos de produtos definidos pelo PNLT . . . . .	228
D.1	Matriz O/D da soja, consolidada por região (em toneladas) . . . . .	230
D.2	Matriz O/D do farelo de soja, consolidada por região (em toneladas) . . . . .	230
D.3	Matriz O/D do milho, consolidada por região (em toneladas) . . . . .	231
D.4	Matriz O/D do açúcar, consolidada por região (em toneladas) . . . . .	231
E.1	Apresentação das microrregiões candidatas à localização de CILs . . . . .	232
E.1	Apresentação das microrregiões candidatas à localização de CILs . . . . .	233
E.1	Apresentação das microrregiões candidatas à localização de CILs . . . . .	234
E.1	Apresentação das microrregiões candidatas à localização de CILs . . . . .	235

# Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 36
ACV	Análise do Ciclo de Vida, p. 29
AHP	Análise Hierárquica de Processos, p. 38
ARS	Análise de Redes Sociais, p. 11
A&HCI	Arts & Humanities Citation Index, p. 12
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social, p. 4
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável, p. 37
CEFIC	The European Chemical Industry Council, p. 85
CH <sub>4</sub>	Metano, p. 36
CIL	Centro de Integração Logística, p. 2
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas, p. 77
CNT	Confederação Nacional dos Transportes, p. 4
COP21	21 <sup>a</sup> Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, p. 62
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono, p. 5
CO	Monóxido de carbono, p. 35
ECTA	The Chemical Logistic Association, p. 86
ELECTRA	Elimination et Choix Trafuisant la Realité, p. 38
EPE	Empresa de Pesquisa Energética, p. 5
FDC	Fundação Dom Cabral, p. 4

GEE	Gases de Efeito Estufa, p. 2
HC	Hidrocarbonetos, p. 35
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas, p. 77
ILOS	Instituto de Logística e Supply Chain, p. 4
ISO	International Organization for Standardization, p. 36
MP	Material particulado, p. 35
MT	Ministério dos Transportes, p. 5
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogênio, p. 35
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso, p. 36
O/D	Matriz origem-destino, p. 3
ONG	Organização não-governamental, p. 166
PAC	Plano de Aceleração do Crescimento, p. 5
PELT	Plano Estadual de Logística e Transporte, p. 6
PFCs	Perfluorocarbonos, p. 36
PIB	Produto Interno Bruto, p. 4
PIL	Programa de Investimento em Logística, p. 6
PLFCMM	Problema de localização de facilidades capacitado multipro- duto multi-camanda, p. 70
PNLP	Plano Nacional de Logística Portuária, p. 5
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transporte, p. 3
PNL	Plano Nacional de Logística, p. 6
PRODLIST	Lista de produtos do PNLT, p. 77
SCI-EXPANDED	Science Citation Index Expanded, p. 12
SCN	Sistema de Contas Nacionais, p. 77
SF <sub>6</sub>	Hexafluoreto de enxofre, p. 36
SO <sub>x</sub>	Óxidos de enxofre, p. 35



SPNT	Secretaria de Política Nacional de Transporte, p. 3
SSCI	Social Sciences Citation Index, p. 12
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, p. 58
TS	Searching Topic, p. 12
TS	Topic, p. 12
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais, p. 16
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, p. 62
VPL	Valor Presente Líquido, p. 49
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development, p. 36
WRI	World Resources Institute, p. 36
WoS	Web of Science, p. 11

# Capítulo 1

## Introdução

Os problemas sobre localização de facilidades estão consolidados na área de Pesquisa Operacional (Melo, Nickel e Saldanha da Gama, 2009), atraindo o interesse de diferentes tipos de pesquisadores em função das variadas aplicações (Tian e Liu, 2015; Ulukan e Demircioglu, 2015; Varsei e Polyakovskiy, 2017) no setor público, privado, militar e/ou empresarial, nacional e internacionalmente (Farahani, SteadieSeifi e Asgari, 2010; Farahani et al., 2018).

Tais facilidades podem estar dedicadas tanto ao transporte de carga (como terminais intermodais e *hubs*), de passageiros (terminais de integração), quanto a serviços ao cidadão (como estacionamentos, postos policiais e escolas). Assim, os tipos de problemas estudados variam de modelos de localização e/ou alocação lineares mais simples a modelagens mais complexas, capacitadas, multiproduto, multiperíodo, multicamada etc.

Em relação ao transporte de carga, entende-se que o tema “localização de facilidades” é fundamental tanto para o sucesso do transporte intermodal (SPNT, 2016; Guimarães et al., 2017ab) quanto para a eficiência da cadeia de suprimentos (Melo, Nickel e Saldanha da Gama, 2009). A localização das facilidades pode impactar, por exemplo, nos tempos de viagem, custo, nível de serviço, cobertura dos serviços oferecidos, entre outros fatores que podem ser otimizados por modelos matemáticos.

Assim, os modelos de localização se diferem em razão de suas funções objetivo, número de facilidades a serem localizadas, região de viabilidade em que os problemas são definidos, entre outros fatores de decisão (Ulukan e Demircioglu, 2015). Em geral, há restrições geográficas, financeiras e/ou de planejamento que influenciam tanto a localização da facilidade quanto sua capacidade de alocação, quando aplicável (Klose e Drexler, 2005; Harris, Mumford e Nain, 2014).

Os principais critérios investigados pela literatura são custo, tempo, distância entre os pontos de produção e consumo, lucro e/ou nível de serviço (Crainic e Laporte, 1997; Klose e Drexler, 2005; Ishfaq e Rox, 2011; Alumur, Kara e Karasan, 2012; Meisel, Krischstein e Bierwirth, 2013; Bhattacharya et al., 2014; Harris, Mumford e

Naim, 2014; Tian e Liu, 2015; Niknamfar e Naiki, 2016; Shaw et al., 2016; Guimarães et al., 2017ab; Varsei e Polyakovskiy, 2017; Farahani et al., 2018).

Há de se reforçar, contudo, que as decisões associadas ao problema de localização e/ou alocação (seja no contexto do *design* e operação de cadeias de suprimentos, nas configurações de redes de *hubs*, centros de integração logística ou voltada para facilidades de operação e gestão mais simplificadas) impactam, também, nas esferas ambientais e sociais (em diferentes escalas) (Anvari e Turkay, 2017).

Assim, ainda que os principais *trade-offs* logísticos adotados nos modelos matemáticos tradicionais se concentrem na dimensão econômica, os diferentes *stakeholders* têm pressionado pela inclusão de elementos sociais (e.g. impacto na comunidade local) e ambientais (e.g. emissão de gases de efeito estufa - GEEs) no processo de tomada de decisão, especialmente, naquele que envolve o *design* das cadeias de suprimentos (Elhedhli e Merrick, 2012; Das e Shaw, 2017; Jindal e Sangwan, 2017; Varsei e Polyakovskiy, 2017).

Porém, os aspectos sociais e ambientais ainda têm atraído atenção limitada da literatura sobre o tema (Varsei et al., 2014; Eskandarpour et al., 2015; Anvari e Turkay, 2017) - fato corroborado pela discussão feita no Capítulo 2. Isso pode ser explicado pela dificuldade em mensurá-los (Farahani, SteadieSeifi e Asgari, 2010; Farahani et al., 2013; Mohammadi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam, 2014).

Neste sentido, desenvolver formulações que incorporem as dimensões ambiental e social é apontado como um dos principais desafios dos estudos desta área para os próximos anos (Arabani e Farahani, 2012; Farahani et al., 2013; Afshari et al., 2014), visando alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável preconizados pelas Nações Unidas (United Nations, 2015).

Salienta-se aqui a falta de consenso sobre como mensurar a dimensão social, tanto nas atividades da cadeia de suprimentos (Varsei et al., 2014) quanto na gestão e avaliação dos sistemas transporte (Guimarães e Leal Jr, 2017; Guimarães, Leal Jr e Silva, 2018), o que justifica a escassez de literatura que aborde tal aspecto. Portanto, assume-se neste trabalho que a incorporação da dimensão ambiental nos modelos matemáticos de localização de facilidades seria um primeiro passo na direção do desenvolvimento de propostas sustentáveis (que, de fato, envolvam as três dimensões - econômica, social e ambiental).

Dessa forma, surge o seguinte questionamento para representar o problema de pesquisa: como incorporar a dimensão ambiental nos modelos matemáticos voltados para localização de facilidades? Assim, a presente tese tem como objetivo principal propor uma modelagem matemática para localização-alocação de centros de integração logística - CILs que considere critérios econômicos e ambientais. Além disso, deseja-se avaliar o comportamento do modelo diante de cenários que impõem políticas específicas de restrição de carbono e/ou determinam o uso de CILs para o

transporte de produtos agrícolas relevantes para a economia brasileira.

Destaca-se que os CILs podem variar em grau de complexidade e serviços oferecidos, desde terminais de transbordo a plataformas logísticas que permitem transformação do produto e oferecem serviços adicionais. Entretanto, neste trabalho considera-se o CIL como uma estrutura simplificada que permite, unicamente, a integração modal.

Como objetivos específicos, têm-se: (i) fazer uma análise cientométrica dos artigos científicos sobre localização de facilidades publicados na base de dados da *Web of Science* até o ano de 2017, identificando a evolução do tema e as principais redes de colaboração entre autores e instituições; (ii) identificar as dimensões consideradas nas modelagens matemáticas sobre localização de facilidades e verificar se há alguma menção específica à sustentabilidade ou à dimensão ambiental; (iii) definir quais os critérios ambientais mais recorrentes nas publicações sobre o tema e como estes são mensurados (caso seja aplicável); (iv) aplicar o modelo matemático proposto ao contexto brasileiro, considerando as matrizes origem-destino (O/D) dos quatro principais produtos agrícolas brasileiros (soja, milho, farelo de soja e açúcar) e a rede de transporte multimodal do Plano Nacional de Logística e Transporte - PNLT; e, (v) apresentar uma análise de sensibilidade, discutindo eventuais alterações nas localizações ótimas indicadas pelo modelo e seus respectivos custos (econômicos e ambientais), quando pesos diferentes são utilizados nas dimensões econômica e ambiental.

O objetivo específico (i) busca demonstrar, com base no volume de publicações, se o tema se mantém relevante nas áreas de estudo, bem como as principais lacunas e tendências para o futuro, visando corroborar com a relevância da pesquisa desenvolvida na presente tese. Já os objetivos (ii) e (iii) visam orientar o desenvolvimento do modelo matemático (escolha dos parâmetros e variáveis, viés e enfoque), enquanto o (iv) tem a proposta de aplicá-lo no contexto brasileiro, onde já existe uma orientação governamental sobre a necessidade de implantação de estruturas logísticas para aumento da eficiência das redes de transporte e redução dos custos (Secretaria de Política Nacional de Transporte - SPNT, 2016) .

O objetivo específico (v), por sua vez, pretende orientar o processo de tomada de decisão caso haja interesse governamental pelo uso do modelo proposto como apoio ao planejamento estratégico no setor de transporte. Com a análise de sensibilidade, busca-se uma tomada de decisão mais acurada que permita analisar diferentes soluções que combinem os desempenhos econômico e ambiental.

Esclarece-se que o modelo matemático desenvolvido nesta tese tem como viés o planejamento estratégico governamental. A revisão de literatura feita nos Capítulos 2 e 3 demonstrou que os modelos existentes estão direcionados para a gestão empresarial (principalmente de cadeias de suprimentos) reforçando, portanto, que o

suporte à gestão governamental é um *gap* a ser investigado em pesquisas futuras.

Ainda, assume-se que a eficiência do planejamento e *design* das cadeias de suprimentos (viés empresarial) está diretamente associada ao planejamento governamental, pois este lida com decisões estratégicas associadas à infraestrutura de transporte, incentivos fiscais, ações voltadas ao desenvolvimento regional (e.g. qualificação da mão de obra) que podem influenciar diretamente na escolha dos potenciais locais das facilidades e, ao mesmo tempo, impactar no custo logístico total da operação dessas redes. Assim, ainda que o modelo proposto esteja voltado para o planejamento governamental, este pode influenciar, mesmo que indiretamente, a gestão empresarial (especialmente no que concerne aos fluxos logísticos).

Neste ponto, cabe justificar o porquê do contexto brasileiro ter sido escolhido para o estudo de caso. De acordo com o Panorama Logístico 2017, publicado pelo Instituto de Logística e *Supply Chain* - ILOS, o custo logístico representa 12,3% do Produto Interno Bruto - PIB brasileiro, frente a um custo de 7,8% dos Estados Unidos (ILOS, 2017). O transporte responde pela maior parcela deste custo (Confederação Nacional dos Transportes - CNT, 2016), tendo consumido 6,8% do PIB no ano de 2015 (CNT, 2016) e 6,6% no ano de 2016 (ILOS, 2017).

Do ponto de vista empresarial, têm-se que os gastos com logística (gestão de estoque e transporte) podem chegar a 7,6% da receita líquida das empresas (ILOS, 2017). Um estudo feito pela Fundação Dom Cabral - FDC em 2017, especificamente com empresas embarcadoras, mostrou que o custo logístico representa, em média, 12,37% do faturamento bruto destas (aumento de 0,64 pontos percentuais em relação a 2016). Este valor varia, contudo, de acordo com o segmento de atuação, chegando a 20,7% no agronegócio e a 26,1% na mineração. Ressalta-se que o custo com transporte responde por 63,5% dos custos logísticos das empresas estudadas (sendo, 40,1% de longa distância e 23,4% de distribuição urbana) (FDC, 2018), o que sugere que melhorias neste setor poderiam aumentar a eficiência dos segmentos empresariais.

O panorama apresentado nos parágrafos anteriores reflete diretamente na competitividade dos produtos brasileiros, nos mercados nacional e internacional. Como resultado, observa-se o aumento do “Custo Brasil”, o qual é calculado com base nas restrições legais, institucionais, burocráticas e estruturais (aqui incluído o transporte) que condicionam as atividades econômicas e sociais, uma vez que elevam os custos dos investimentos e comprometem a competitividade da produção nacional (CNT, 2017).

Neste contexto, o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES (2017) defende que a melhoria da infraestrutura logística é fator fundamental para recuperação da economia brasileira, tendo em vista seu impacto sistêmico nos demais setores, especialmente na indústria extrativa mineral, agropecuária e de be-

bidas. Entretanto, os investimentos do país em logística no período 1993 - 2015 representaram apenas 0,5% do PIB nesse setor, o que corresponde a um décimo do investimento da China e metade da América Latina (BNDES, 2017).

Como resultado, o país ocupa a 56<sup>a</sup> posição no *ranking* global do *World Bank*, liderado pela Alemanha, que mede o desempenho da logística comercial dos países. O Brasil está atrás da China (26<sup>o</sup>) e da Índia (44<sup>o</sup>) - que compõem os BRICs, junto com a Rússia (75<sup>a</sup>) - e de países Latino Americanos, como Chile (34<sup>o</sup>) e México (51<sup>o</sup>) (*World Bank*, 2018).

No que diz respeito à infraestrutura de transporte, também se verifica retração nos gastos públicos e privados. De acordo com a CNT (2018), os investimentos em infraestrutura de transporte que eram de 2,03%, em média, na década de 70 caíram para 0,63% nos anos 2000, chegando a 0,61% do PIB em 2016. Tais valores são inferiores à média global e à necessidade nacional (CNT, 2018). A redução nos montantes de investimento é preocupante, tendo em vista que a inadequação da infraestrutura logística brasileira é considerada um dos principais entraves para o aumento da produção em alguns setores (BNDES, 2017).

Os problemas envolvem desde a falta de armazéns destinados às safras agrícolas, à inadequação dos modos de transporte (rodovias, ferrovias e portos) para o escoamento. Como consequência, tem-se o encarecimento dos fretes, que pode inviabilizar a produção em determinadas regiões do país (BNDES, 2017). Somado a isso, há de se enfatizar o desbalanceamento da matriz de transporte de carga, com predominância do modo rodoviário (61% - CNT, 2017), o qual é o maior responsável pela emissão de CO<sub>2</sub><sup>1</sup> (Xifeng, Ji e Peng, 2013; Niknamfar e Naiki, 2016; EPL, 2018).

Entretanto, mesmo com a retração nos investimentos (justificada, em parte, pela crise econômica que o país tem sofrido), o governo brasileiro tem se preocupado com o planejamento integrado do setor de transporte - que é apontado, pelo BNDES (2017), como um desafio para a área. Verifica-se que o setor tem sido alvo de diferentes planos governamentais visando aumentar a eficiência das redes logísticas e reduzir o Custo Brasil, como: o Plano de Aceleração do Crescimento – PAC (Ministério dos Transportes - MT, 2013a e 2014b), o Plano Nacional de Logística Portuária – PNL (SEP, 2012), o Programa de Investimento em Logística – PIL

---

<sup>1</sup>A literatura aponta o setor de transporte como uma das principais fontes de emissão de CO<sub>2</sub> (Kizilboga et al, 2013; Eskandarpour et al., 2015; Zhang et al., 2015; Zhalechian et al, 2016). Neste contexto, Shawn et al. (2016) afirmam que a comunidade internacional está envolvida no desenvolvimento de regulamentação visando a redução da pegada de carbono. Como resultados iniciais, estão vigentes políticas relacionadas à taxa de carbono (*carbon tax*), à limitação da emissão (*carbon cap*) e ao comércio de carbono que têm sido, gradualmente, adotadas por diversos setores e países. Salienta-se, ainda, a relação fundamental entre transporte e localização de facilidades no alcance das metas de redução da emissão de carbono (Ghaddar e Naoum-Sawaya, 2011). No que diz respeito ao contexto brasileiro, o Balanço Energético Nacional publicado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE no ano de 2018 indica que o setor de transportes foi responsável por 45,8% das emissões de CO<sub>2</sub> em 2017. Maiores discussões acerca deste tópico serão apresentadas no Capítulo 3.

(EPL, 2014) e, mais recentemente, o Plano Nacional de Logística - PNL (EPL, 2018) que está em fase de elaboração.

Dentre eles, destaca-se o PNLT (MT, 2007, 2009 e 2012), considerado o marco na retomada do planejamento integrado do setor de transportes no país (Fleury, 2013; Costa, 2014; Quadros e Nassi, 2015; Guimarães, 2017ab; EPL, 2018), após um longo período de falta de investimentos coordenados e sistêmicos. Com características de Plano Plurianual, o PNLT estima as matrizes de produção e consumo de diferentes tipos de produtos brasileiros para o ano de 2031 (extensão temporal feita na segunda revisão do plano), indicando os investimentos necessários na infraestrutura de transportes para que se alcance o reequilíbrio da matriz e a racionalização dos custos (Guimarães, 2015). Isso justifica sua escolha para execução do estudo de caso e das análises propostas nos objetivos específicos (iv) e (v).

Enfatiza-se que, após o lançamento do PNLT, diferentes planos começaram a apontar a necessidade da implantação de estruturas de integração logística para o aumento da eficiência do setor (como os Planos Estaduais de Logística e Transporte - PELT do Espírito Santo e do Rio de Janeiro - Guimarães, 2015). Assim, em 2015, o governo federal apresentou um projeto em que se percebe um direcionamento dos esforços governamentais para a implantação de centros de integração logística (SPNT, 2016), que permitiriam a efetivação da intermodalidade (umas das principais propostas do PNLT) e, conseqüentemente, a redução dos custos. Portanto, nota-se que a pesquisa desta tese está aderente ao planejamento governamental do setor.

Salienta-se, contudo, que os modelos matemáticos propostos no projeto mencionado (que será chamado neste documento de “Projeto CIL”) não consideram o aspecto ambiental de maneira explícita, embora o Relatório 3 Tomo I destine uma seção para investigação dos aspectos ambientais associados à implantação de CILs. Portanto, esta é a lacuna a ser preenchida pelo presente trabalho.

Dessa forma, acredita-se que o desenvolvimento de um modelo que auxilie no planejamento estratégico da infraestrutura de transporte, com enfoque na localização de facilidades que permitam a integração logística, é relevante em um momento de escassez e necessidade de priorização de recursos. Especialmente, se tal modelo fomentar a intermodalidade e, conseqüentemente, o reequilíbrio da matriz de transportes (como proposto pelo PNLT, 2007, 2009 e 2012), considerando também as emissões de CO<sub>2</sub>.

Por meio da promoção da intermodalidade, a localização ideal dos terminais poderia auxiliar na redução dos custos logísticos (viés econômico), dos congestionamentos em áreas urbanas e acidentes nas estradas (viés social) e dos impactos ambientais associados ao sistema de transporte (viés ambiental) - preocupações já apontadas pela CNT (2017).

Adicionalmente, acredita-se que um sistema de transporte eficiente e eficaz é

essencial para redução da pobreza em países em desenvolvimento (United Nations, 2015), como o Brasil. Especialmente porque os padrões atuais de transporte, não-sustentáveis, podem exacerbar os problemas sociais e ambientais (Guimarães e Leal Jr, 2017).

Reconhece-se a existência de uma diversidade de modelos matemáticos que contribuam para o aumento da eficiência das cadeias logísticas, contudo se reforça a necessidade de incorporar a análise dos aspectos ambientais e sociais advindos das atividades de produção e transporte (exclusivamente transporte, no caso desta tese). Isso porque, algumas vezes, a rede mais eficiente do ponto de vista do custo pode, por exemplo, emitir maiores quantidades de GEEs e poluentes atmosféricos, causando danos ambientais (degradação do ar) e sociais (e.g. o aumento de crises alérgicas decorrentes das emissões de material particulado).

Dessa maneira, torna-se relevante investigar se os critérios sociais e ambientais estão sendo propostos nos modelos matemáticos, a fim de propor modelos mais aderentes e/ou que avancem em uma direção mais sustentável em futuras pesquisas. Enfatiza-se que, por conta da dificuldade de mensuração dos impactos sociais, já apresentada ao longo desta introdução, a dimensão social não será incorporada na modelagem matemática desenvolvida nesta tese.

Por fim, salienta-se que para melhoria do desempenho logístico brasileiro, além da adequação dos sistemas de transporte, há necessidade de reorientação da carga tributária (Souza e Bouchut, 2017; CNT 2018; BNDES, 2017), das fontes de financiamento (BNDES, 2017) e redução da burocracia (Souza e Bouchut, 2017; FDC, 2018). Entretanto, tais fatores não serão discutidos por estarem fora do escopo desta pesquisa.

A partir desta Introdução, a presente tese está dividida em seis capítulos. O Capítulo 2 apresenta um panorama sobre o tema de localização de facilidades, discorrendo sobre os principais tópicos de interesse, além das redes de colaboração entre organizações e pesquisadores do tema. Já o Capítulo 3 se concentra na discussão dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades e meio ambiente, identificados no Capítulo 2. Discutem-se quais os critérios ambientais mais recorrentes nas publicações sobre o tema e como estes são mensurados visando consolidar um embasamento teórico para a proposição do modelo matemático indicado como objetivo principal deste trabalho.

O Capítulo 4, por sua vez, apresenta o modelo matemático proposto que foi testado a partir da adoção dos parâmetros apresentados no Capítulo 5. Os resultados obtidos para cada um dos cenários estabelecidos estão descritos no Capítulo 6. O Capítulo 7 discorre sobre as considerações finais da presente tese, feitas a partir da reflexão sobre os capítulos anteriores. Por fim, têm-se as referências bibliográficas que deram suporte ao desenvolvimento desta pesquisa e os apêndices.



# Capítulo 2

## Panorama sobre o tema localização de facilidades

Conforme apresentado no Capítulo 1, os problemas de localização de facilidades estão consolidados no campo da pesquisa operacional (Macharis e Botekoning, 2004; Klose e Drexl, 2005; Melo, Nickel e Saldanha da Gama, 2009), representando a maior parte da área *Operations Research e Management Science* (Farahani, SteadieSeifi e Asgari, 2010; Ansbro e Wang, 2013).

Entende-se como “localização de facilidades” o ramo da P.O. que lida com problemas de localização e/ou posicionamento de facilidades a fim de otimizar, pelo menos, uma função objetivo – e.g. custo, lucro, receita, distância, tempo, cobertura ou participação de mercado (Farahani, SteadieSeifi e Asgari, 2010).

Há de se ressaltar, portanto, que a importância desta área não está restrita apenas ao âmbito acadêmico. Tais modelos têm sido amplamente estudados justamente em função da sua diversidade de aplicações (Ulukan e Demircioglu, 2015; Farahani et al., 2018), auxiliando no processo de tomada de decisão tanto no âmbito público quanto no privado (Farahani et al., 2012).

Do ponto de vista empresarial, as decisões sobre localização de novas fábricas, centros de distribuição e/ou estruturação da cadeia de suprimentos (como um todo ou apenas do ramo de distribuição) são fundamentais para o sucesso organizacional (Daskin, Snyder e Berger, 2003; Klose e Drexl, 2005; Melo, Nickel e Saldanha da Gama, 2009; Farahani et al., 2012), pois impactam diretamente nas decisões táticas e operacionais das empresas (Farahani et al., 2018).

Varsei e Polyakovskiy (2017) defendem, inclusive, que o problema de localização e/ou alocação é um dos mais importantes no *design* das cadeias de suprimentos, pois envolve decisões estratégicas - quanto ao número, à localização e à capacidade das instalações - que influenciarão diretamente a eficiência das diferentes redes logísticas.

Já do ponto de vista governamental, além do impacto econômico direto, os modelos poderiam auxiliar, ainda que indiretamente, no alcance das metas de políticas

públicas das áreas de saúde, educação e segurança pública, por exemplo. Isso porque permitem definir a região de instalação ótima de escolas, hospitais e postos policiais, cuja qualidade dos serviços prestados é influenciada pela sua localização (Klose e Drexl, 2005).

Além disso, tais modelos podem ser uma ferramenta estratégica para o planejamento da infraestrutura de transporte, pois dão suporte à definição da localização ótima de terminais de integração logística e a alocação dos fluxos. Terminais, estes, reconhecidos pelo governo federal brasileiro como elementos estratégicos da rede (SPNT, 2016), por permitirem a intermodalidade.

Assim, acredita-se que seu posicionamento adequado poderia proporcionar uma redução dos custos logísticos, dos congestionamentos das áreas urbanas, dos impactos ambientais, além de permitir o reequilíbrio da matriz de transporte (Sirikijpanichkul e Ferreira, 2005; Guimarães et al., 2017; SPNT, 2016), conforme discutido no Capítulo 1.

Percebe-se, portanto, que o interesse pelo tema é reflexo da flexibilidade dos modelos matemáticos em lidar com uma variedade de situações associadas ao planejamento de diferentes áreas (como constatado, anteriormente, por Gosh e Craig, 1984). Não obstante, a aplicabilidade dos modelos existentes está sempre em discussão, buscando-se formulações mais adequadas às operações e às inovações trazidas aos diferentes setores (Afshari et al., 2014).

Tendo em vista que as aplicações e os tipos de modelos variam de lineares simples (único produto e não-capacitados) a modelos probabilísticos não lineares, que requerem, muitas vezes, o desenvolvimento de algoritmos de solução específicos (Klose e Drexl, 2005); a Tabela 2.1 apresenta artigos sobre localização de facilidades que fazem *surveys* dos principais modelos presentes da literatura incluindo, em alguns casos, métodos de solução. Recomenda-se a leitura destes trabalhos para uma melhor compreensão dos modelos clássicos ( $p$ -mediana,  $p$ -centro, cobertura, localização de *hub*, entre outros).

Por meio da Tabela 2.1, nota-se que os *surveys* são dedicados ao estudo de modelos clássicos de localização de facilidades e, em alguns casos, abordam as inovações mais recentes sobre o tema. Apenas Eskandarpour et al. (2015) mapeia, de fato, a evolução da produção científica, embora o enfoque não esteja em modelos de localização (mas no *design* da cadeia de suprimentos).

Neste sentido, acredita-se que o desenvolvimento de uma pesquisa cientométrica pode auxiliar na proposição de futuros modelos matemáticos (incluído, aqui, o da presente tese) a partir da identificação da maturidade da área de pesquisa, bem como dos principais autores e centros de excelência. Além disso, conhecer as redes de colaboração pode facilitar no estabelecimento de parcerias de pesquisa visando lidar com os desafios recentes da área.

Tabela 2.1: Artigos que apresentam *surveys* sobre modelos de localização de facilidades

<b>Autor</b>	<b>Descrição</b>
Ahmadi-Javid, Seyedi e Syam (2017)	Fazem um <i>survey</i> dos modelos clássicos de localização de facilidades (e.g. p-mediana e cobertura), porém, com viés voltado para facilidades da área de saúde (ex. hospitais)
Alumur e Kara (2008)	Revisam a literatura sobre modelos de localização de <i>hubs</i> publicados de 1990 a 2001.
Arabani e Farahani (2012)	Apresentam um <i>overview</i> das classificações e aplicações dos problemas de localização, discutindo os principais modelos estáticos (e.g. cobertura e centro) e dinâmicos (e.g. localização-realocação e <i>time dependents</i> ).
Campbell e O’Kelly (2012)	Analisa a evolução dos estudos na área de localização de facilidades, de 1986 a 2011.
Crainic e Laporte (1997)	Apresentam modelos de planejamento de transporte aplicados aos diferentes níveis (tático, estratégico e operacional), incluindo modelos de localização.
Eskandarpour et al. (2015)	Fazem uma revisão de literatura sobre <i>design</i> de redes de suprimentos, envolvendo modelos de cobertura que incluem fatores sociais, econômicos e/ou ambientais.
Farahani, SteadieSeifi e Asgari (2010)	Analisa problemas de localização multicritério (bi-objetivo, multi-objetivo e multi-atributo) e seus métodos de solução
Farahani et al. (2012)	Apresentam uma revisão de literatura específica sobre problemas de cobertura.
Farahani et al. (2013)	Atualizam o trabalho de Alumur e Kara (2008) com estudos sobre localização de <i>hub</i> publicados a partir de 2007 (incluindo aplicações de métodos exatos, heurísticos e meta-heurísticos).
Farahani et al. (2014)	Apresentam um <i>survey</i> dos modelos clássicos de localização hierárquica de facilidades, incluindo métodos de solução publicados na base de dados Scopus, de 1978 a 2012.
Farahani et al. (2019)	Fazem um <i>survey</i> sobre a localização de facilidades de serviços em áreas urbanas, segregando-as por categorias (sistemas de gerenciamento de resíduos; desastres de larga escala; emergências de pequena escala; serviços e infraestruturas gerais; sistemas de saúde; sistemas e infraestrutura de transporte).
Klose e Drexler (2005)	Fazem um <i>survey</i> sobre estudos de localização de facilidades, comparando contínuos com discretos, capacitados com não-capacitados, <i>single-source</i> com <i>multiple-source</i> e estáticos com dinâmicos.
Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2009)	Analisa artigos sobre localização-alocação aplicada ao contexto logístico, especialmente cadeia de suprimentos.
Ortiz-Astorquiza, Contreras e Laporte (2018)	Fazem uma revisão de literatura sobre problemas de localização de facilidades multicamadas, apresentando formulações, algoritmos e aplicações

Assim, a Seção 2.1 se dedica a apresentar o panorama das publicações mundiais

sobre localização de facilidades, evidenciando os principais autores, organizações, tópicos de interesse, entre outros aspectos que possam corroborar o grau de inovação, ainda que incremental, apresentado nesta tese.

Especificamente em relação a esta tese, a Cientometria permite identificar os trabalhos com aderência ao objeto específico de estudo (neste caso, localização de facilidades considerando as dimensões econômica e ambiental). Dessa maneira, o embasamento científico da pesquisa ganha maior robustez, embora os resultados estejam limitados pela escolha das palavras-chave, da base de dados e do recorte temporal definido (como discutido na Seção 2.1).

Vale salientar que, na pesquisa de literatura preliminar (feita no portal Periódicos Capes), o trabalho de Liu e Gui (2016) foi o único encontrado que aplica tal metodologia no setor de transportes. Contudo, os autores se dedicam a analisar a evolução das pesquisas da área *Transport Geography*, não estendendo a discussão para o tema abordado nesta pesquisa.

## 2.1 Estudo cientométrico da produção científica internacional sobre localização de facilidades

Esta seção tem como objetivo mapear a produção científica internacional sobre localização de facilidades, a partir de uma abordagem quantitativa, com a aplicação de métodos estatísticos aliados à Cientometria e à Análise de Redes Sociais (ARS).

A Cientometria visa compreender a estrutura, evolução e conexões de uma dada área ou campo de estudo estabelecendo, assim, relações entre a ciência e o desenvolvimento tecnológico, econômico e social (Gregolin, 2005). A metodologia de ARS, por sua vez, permite identificar a importância ou a proeminência dos atores de uma rede social, assim como graus de proximidade entre os documentos e a colaboração entre autores (Guimarães et al., 2011).

Para identificar a produção científica relacionada ao tema “localização de facilidades”, analisaram-se os artigos registrados na *Web Of Science - WoS*, escolhida por ser a base de dados com abrangência e cobertura satisfatória (Chen, 2010), e por ser de acesso gratuito às instituições de pesquisa públicas brasileiras (Motta e Quintella, 2012). Nesse contexto, por meio de uma análise cientométrica, foram realizadas as etapas apresentadas na Figura 2.1.

Destaca-se que na Etapa 1, os termos de busca foram definidos por meio de uma pesquisa preliminar em artigos considerados *benchmark* sobre o tema (os quais foram apresentados no preâmbulo do Capítulo 2). Assim, os detalhes do processo de busca e extração da base de dados (Etapa 2) estão descritos na Tabela 2.2.

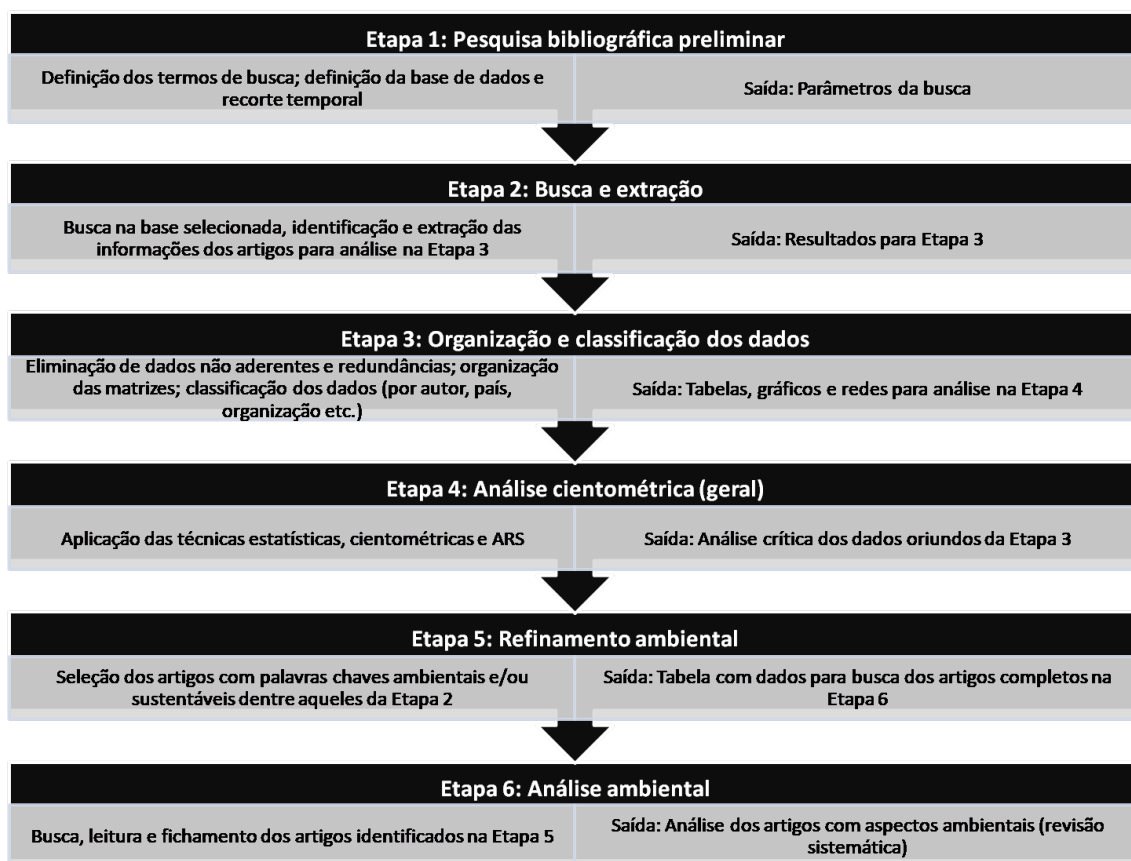


Figura 2.1: Etapas da pesquisa cientométrica

Tabela 2.2: Definição da estratégia de busca

<b>Critério</b>	<b>Descrição</b>
Tópico <sup>(1)</sup>	TS = (“facilit* locatio*” OR “hub* locatio*” OR “p-median” OR “set covering proble*” OR “p-cent*” OR “maximal cover*”)
Base de dados	<i>Web of Science</i>
Índices	SCI-EXPANDED <sup>(2)</sup> , SSCI <sup>(3)</sup> , A&HCI <sup>(4)</sup> , CPCI-S <sup>(5)</sup> , CPCI-SSH <sup>(6)</sup> , ESCI <sup>(7)</sup>
Cobertura temporal	Todos os anos até 2017
Refinamento	Nenhum, o que significa que a pesquisa considerou as publicações de todas as áreas da <i>WoS</i>
Data da busca	25 de abril de 2018, às 14h25

Nota: (1) Os termos são buscados no título dos artigos, resumos e palavra-chave. “TS” indica que o tipo de busca é *Searching Topic*; (2) *Science Citation Index Expanded* (SCI-EXPANDED) cobre mais de 8.300 periódicos em 150 diferentes áreas, com publicações a partir 1900. (3) O *Social Sciences Citation Index* (SSCI) foca as ciências sociais, cobrindo 2.950 fontes de publicação, em mais de 50 disciplinas, desde 1900. (4) O *Arts & Humanities Citation Index* (A&HCI) é um índice de citação na área de Artes e Humanidades, com cobertura de mais de 1.600 fontes de publicação, desde 1975. (5) Abrange a literatura de conferências em todos os campos técnicos e científicos; (6) Abrange a literatura de conferências em todos os campos das ciências sociais,

artes e humanidades; (7) Abrangendo publicações a partir de 2015, esse índice contém registros de artigos de periódicos ainda não cobertos pelo SCI-EXPANDED, SSCI ou A&HCI (Thomson Reuters, 2016).

A Etapa 3 envolveu um refinamento da seleção e organização da base de dados. Após esta adequação (padronização dos nomes dos autores, das organizações etc.), foi feito um filtro considerando apenas as áreas aderentes ao setor de transportes. Dessa forma, os artigos indexados na área médica (como *Oncology*, *Immunology*, *Cardiovascular System and Cardiology*) e outras áreas (como *Electrochemistry*, *Marine & Freshwater Biology e Biophysics*) que não estavam aderentes aos modelos de localização em transporte, foram removidos. Com isso, dos 8.328 trabalhos reportados na primeira busca, restaram 7.773 publicações, equivalente a 93,3%.

Ressalta-se que, na Etapa 3, utilizou-se o *software* de mineração de dados Vantage Point (The Vantage Point, 2016), enquanto para a Etapa 4 aplicou-se o UCinet (Borgatti, Everett e Freeman, 2002). A Tabela 2.3 resume os critérios analisados na Etapa 4.

Tabela 2.3: Indicadores cientométricos

<b>Indicador</b>	<b>Descrição</b>
Número de trabalhos	Detalha a evolução da publicação ano a ano
Co-autoria	Mostra o grau de colaboração entre os autores
Mapas dos campos científicos e dos países	Auxiliam a localizar as posições relativas de diferentes países na cooperação científica global, bem como as principais áreas que se interessam pelo tema
Palavras-chave	Permitem identificar os principais termos associados à determinada busca, bem como a evolução dos termos ao longo dos anos

Enfatiza-se que a Etapa 4 apresenta um panorama geral sobre a produção científica relacionada à localização de facilidades. No entanto, como esta tese tem um viés ambiental, ou seja, tem como objetivo principal propor um modelo matemático que incorpore, além da dimensão econômica tradicional, a dimensão ambiental no processo de localização-alocação de estruturas de integração, foi necessário adicionar as Etapas 5 e 6.

Assim, a partir dos resultados encontrados na Etapa 4, foram selecionados apenas os artigos que continham palavras-chave ambientais (e/ou sustentáveis), de maneira a conduzir uma revisão sistemática que pudesse dar suporte ao desenvolvimento do modelo matemático proposto na presente tese. Os procedimentos associados a este refinamento estão descritos ao final desta seção (especialmente na Tabela 2.10) e deram origem ao Capítulo 3.

A evolução temporal das 7.773 publicações identificadas na Etapa 3 é apresentada na Figura 2.2. Nota-se que o primeiro registro data de 1968 e que o volume de

publicação se manteve baixo até os anos 90, com menos de 25 *papers* por ano. Isto pode ser explicado pelo grau de complexidade inerente à resolução dos problemas de localização, os quais se tornaram mais atraentes com o aprimoramento da capacidade de processamento computacional.

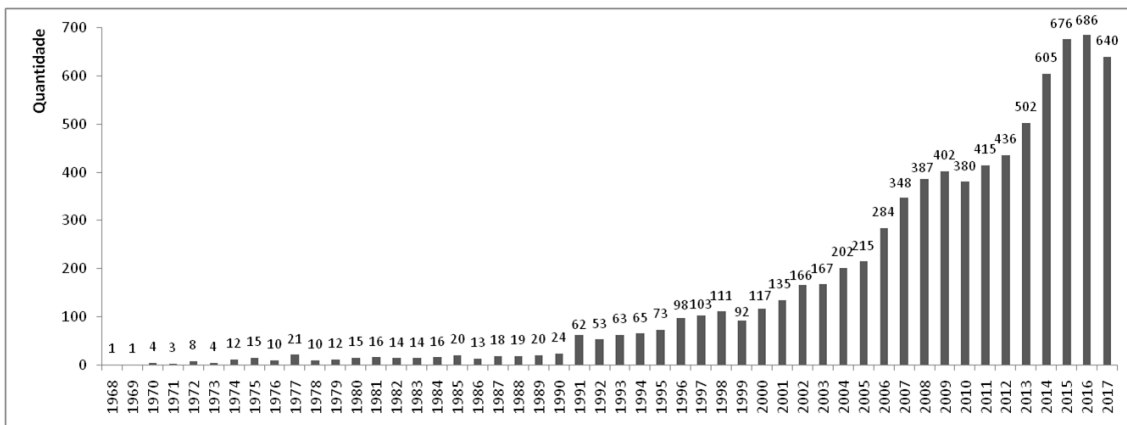


Figura 2.2: Evolução das publicações sobre localização de facilidades

A contar de 1991, observa-se uma tendência mais clara de crescimento da produção científica sobre “localização de facilidades”, embora apenas a partir de 1997 o nível de publicação tenha superado 100 trabalhos por ano (com exceção de 1999). Em 2004, o número de publicações rompeu o patamar de 200 artigos por ano, superando 500 em 2013 e 600 em 2014.

Pode-se afirmar, portanto, que a comunidade científica tem interesse pelo tema em estudo. Isto é corroborado pelo fato do volume de publicação em 2017 ser 10,32 vezes maior que em 1991. Além disso, verifica-se uma intensificação das publicações, especialmente a partir dos anos 2000 (embora a produção de 2017 tenha sido inferior aos dois anos anteriores). Não obstante, o volume de *papers* registrados em 2017 é, por exemplo, 3,17 vezes maior que em 2004 e 1,28 vezes superior a 2013.

Uma vez demonstrado que o tema é de interesse da comunidade científica (justificando sua abordagem na presente pesquisa), é possível identificar os principais autores que publicam sobre o assunto. Dentre, aproximadamente, 17.500 autores (e coautores) que assinam os artigos selecionados, apenas 1,7% estão listados em mais de 10 publicações. Assim, a Tabela 2.4 apresenta os principais autores (e/ou coautores) que respondem por, pelo menos, 24 *papers*.

Dentre os principais autores, destacam-se Drezner, Z., Crawford, B. e Berman, O. com 89, 71, 64 publicações, respectivamente. Em seguida, tem-se Soto, R. (com 60 *papers*) e Nickel, S. (com 59). O primeiro autor brasileiro que aparece na base de dados é De Camargo, R. S., com 12 artigos publicados. Ele ocupa a 30ª posição, empatado com outros 51 pesquisadores. Em uma perspectiva global há 147 autores com maior volume de publicação que o brasileiro.

Tabela 2.4: Principais autores da área (com volume de publicação de, pelo menos, 24 papers)

Posição	Autores	Publicação (qdt)	%
1º	Drezner, Z.	89	1,14%
2º	Crawford, B.	71	0,91%
3º	Berman, O.	64	0,82%
4º	Soto, R.	60	0,77%
5º	Nickel, S.	59	0,76%
6º	Tamir, A.	48	0,62%
	Tavakkoli-Mogahddam, R.	48	0,62%
7º	Puerto, J.	47	0,60%
8º	ReVelle, C.S.	42	0,54%
9º	Xu, D.	40	0,51%
10º	Church, R. L.	39	0,50%
	Paredes, F.	39	0,50%
	Wesolowsky, G.O.	39	0,50%
11º	Brimberg, J.	32	0,41%
	Ouyang, Y.	32	0,41%
12º	Drezner, T.	31	0,40%
13º	Alkorta, I.	29	0,37%
	Elguero, J.	29	0,37%
	Murray, A.T.	29	0,37%
	Salhi, S.	29	0,37%
14º	Fernandez, J.P.	28	0,36%
15º	Farahani, R.Z.	27	0,35%
	Johnson, F.	27	0,35%
	Marin, A.	27	0,35%
	Olguin, E.	27	0,35%
16º	Mladenovic, N.	26	0,33%
17º	Batta, R.	25	0,32%
	Laporte, G.	25	0,32%
	Rodriguez-Chia, A.M.	25	0,32%
18º	Carrizosa, E.	24	0,31%
	Del Bene, J. E.	24	0,31%
	Krass, D.	24	0,31%
	Labbe, M.	24	0,31%
	Plastria, F.	24	0,31%

Destaca-se que o percentual da Tabela 2.4 não é cumulativo, pois um mesmo artigo é contabilizado para todos os autores que o compõem. Em outras palavras, dois autores com o mesmo volume de publicação podem ser apenas coautores dos mesmos trabalhos. Por exemplo, os *papers* publicados por Drezner, Z. e Berman, O. não correspondem a 2,27% da base de dados, pois eles são coautores em 18 publicações. Isso significa que Drezner, Z. tem 71 trabalhos diferentes de Berman,



O. sobre o tema. Esta lógica também deve ser aplicada às Tabelas 2.5 e 2.6.

Em relação às principais organizações, cerca de 80% são universidades, o que pode ser justificado pelo fato da principal característica desse tipo de instituição ser a busca por inovação. Entretanto, a Tabela 2.5, que apresenta as quinze principais organizações em termos de volume de publicação, evidencia a presença de uma empresa - a IBM CORP - entre tais instituições. Isso pode ser explicado pela relação de coautoria que ela mantém com universidades.

Nas primeiras colocações da Tabela 2.5 estão Univ Toronto e Univ Seville com mais de 100 *papers* sobre o tema, cada. Entretanto, há preponderância de organizações estadunidenses e iranianas dentre àquelas com maior volume de publicação. Destaca-se a presença de uma universidade latino-americana entre as seis primeiras colocadas: Pontificia Univ Catolica Valparaiso, com 76 *papers*.

Tabela 2.5: Quinze principais organizações em volume de publicação

Posição	Organização	Tipo	País	Volume	%
1º	Univ Toronto	Univ.	Canadá	108	1,39
2º	Univ Seville	Univ.	Espanha	105	1,35%
3º	Amirkabir Univ	Univ.	Irã	91	1,17
4º	Tel Aviv Univ	Univ.	Israel	89	1,14
5º	Ohio State Univ	Univ.	Canadá	85	1,09
	Univ Tehran	Univ.	Irã	85	1,09
6º	Calif State Univ Fullerton	Univ.	EUA	76	0,98
	Pontificia Univ Catol Valparaiso	Univ.	Chile	76	0,98
7º	Iran Univ Sci & Technol	Univ.	Irã	75	0,96
8º	Univ Illinois	Univ.	EUA	71	0,91
9º	MIT	Univ.	EUA	67	0,86
10º	Tsinghua Univ	Univ.	China	66	0,85
	IBM CORP	Empresa	Internacional	66	0,85
11º	Carnegie Mellon Univ	Univ.	EUA	63	0,81
	Cornell Univ	Univ.	EUA	63	0,81

Nota: Destaca-se que não foram contabilizadas as publicações de outros *campi* da Calif State Univ e da Univ Illinois, de maneira a evidenciar aquele que mais se destaca na pesquisa sobre o tema.

A primeira organização brasileira que aparece na base é a Univ Federal de Minas Gerais - UFMG, empatada na 32º posição, com seis instituições cujo volume de publicação é de 35 artigos, cada. Contudo, há 57 organizações com produção científica superior à UFMG. Detalhes específicos do contexto brasileiro são abordados em Guimarães, Ribeiro e Azevedo-Ferreira (2018).

No que diz respeito à distribuição da produção científica entre os países, tem-se a Tabela 2.6. Verifica-se que os EUA concentram o maior volume de publicação,

com 2,19 vezes mais artigos que a China, a 2<sup>a</sup> colocada. Além disso, quase 30% dos artigos sobre o tema têm, pelo menos, um autor com filiação a uma organização estadunidense.

É importante ressaltar que o Brasil está entre os 20 países que mais publicam sobre o tema, na 14<sup>a</sup> posição dentre as 106 nações. De acordo com Guimarães, Ribeiro e Azevedo-Ferreira (2018), isso se dá pela sua rede de colaboração internacional e pela forte relação mantida entre universidades, empresas e instituições governamentais (dentre as principais organizações que publicam sobre o tema no país).

Ainda, Brasil e Chile são os únicos países latino-americanos que se encontram na Tabela 2.6. Em relação aos BRICS, o país está atrás da China e da Índia; porém está à frente de países desenvolvidos como Bélgica, Portugal, Polônia e Suíça (20<sup>o</sup> a 23<sup>o</sup> colocados).

Tabela 2.6: Países com maior volume de publicação sobre o tema

Posição	País	Volume de publicação	%
1 <sup>o</sup>	USA	2217	28,52
2 <sup>o</sup>	China	1013	13,03
3 <sup>o</sup>	Canada	629	8,09
4 <sup>o</sup>	Germany	444	5,71
5 <sup>o</sup>	Iran	417	5,36
	Spain	417	5,36
6 <sup>o</sup>	France	396	5,09
7 <sup>o</sup>	UK	353	4,54
8 <sup>o</sup>	Turkey	290	3,73
9 <sup>o</sup>	Japan	284	3,65
10 <sup>o</sup>	Italy	267	3,43
11 <sup>o</sup>	India	212	2,73
12 <sup>o</sup>	Taiwan	177	2,28
13 <sup>o</sup>	Israel	171	2,20
14 <sup>o</sup>	Brazil	170	2,19
15 <sup>o</sup>	South Korea	169	2,17
16 <sup>o</sup>	Netherlands	166	2,14
17 <sup>o</sup>	Russia	152	1,96
18 <sup>o</sup>	Australia	134	1,72
19 <sup>o</sup>	Chile	129	1,66

No que diz respeito à evolução dos 20 principais países, a liderança dos EUA pode ser explicada pela constância na publicação desde a década de 70, com intenso crescimento a partir dos anos 2000. A maior parte dos países direcionou a atenção para este tema a partir da década de 90, inclusive a China (2<sup>a</sup> colocada). Irã, Canadá e Espanha também demonstram interesse crescente pelo tema, especialmente na última década.



Tabela 2.4), que estão totalmente interconectados. Isso ajuda a explicar o motivo pelo qual tais autores têm posição de destaque, tendo em vista que produzem juntos e mantém uma intensa rede de colaboração (ratificada pela espessura na linha que os conecta). Crawford, B. e Soto, R., por exemplo, são coautores em 59 *papers*.

Alkorta, I., Del Bene, E. e Elguero, J. também têm uma lógica própria de colaboração, mantendo relacionamentos fortes entre si, justificando sua presença na Tabela 2.4. Em relação à rede principal, percebe-se, que embora Nickel, S. (5º colocado) tenha relação com maior número de autores, Drezner, Z. (1º no *ranking*) mantém uma maior quantidade de relações fortes, inclusive com Berman, O. (3º colocado). Tais fatos ajudam a explicar o porquê destes autores se destacarem.

Adicionalmente, é possível mapear as áreas com maior interesse sobre o tema (associado ao volume de publicação). Foram encontrados registros em 103 segmentos, dos quais se destacam: *Operations Research & Management Science*, *Computer Science* e *Engineering*, com 2780, 2708 e 2181 artigos, respectivamente. Em seguida, têm-se *Mathematics* e *Business & Economics* com mais de 1300 artigos cada. *Transportation* aparece na 6ª posição, com apenas 527 *papers*.

A Tabela 2.7 apresenta as treze principais áreas de interesse sobre o assunto, com mais de 100 artigos publicados, cada. Ressalta-se que um *paper* pode estar indexado a mais de uma área na base de dados, portanto, os valores não são cumulativos. Acredita-se que a proposta desta tese esteja aderente às áreas que ocupam as seis primeiras posições, especialmente *Operations Research & Management Science*, *Engineering* e *Transportation*. Cabe ponderar que a análise cientométrica corroborou a constatação de Farahani, SteadieSeifi e Asgari (2010) de que os problemas de localização se destacam dentre os temas de interesse da área que desponta na primeira colocação da Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Principais áreas de interesse pelo tema localização de facilidades

Posição	Área	Volume de publicação
1º	Operations Research & Management Science	2780
2º	Computer Science	2708
3º	Engineering	2181
4º	Mathematics	1331
5º	Business & Economics	1324
6º	Transportation	527
7º	Chemistry	449
8º	Environmental Sciences & Ecology	310
9º	Telecommunications	255
10º	Physics	228
11º	Automation & Control Systems	222
12º	Geography	184
13º	Science & Technology - Other Topics	152

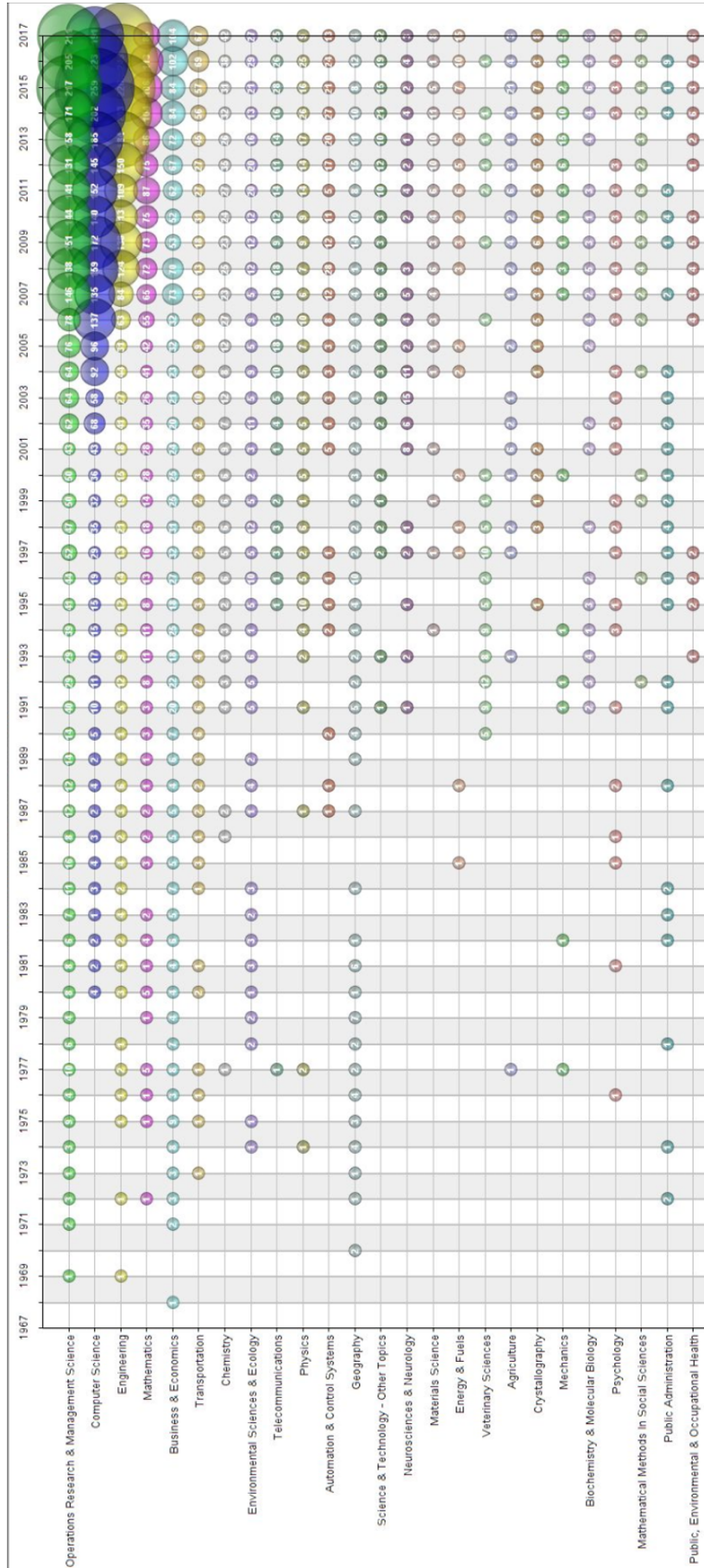


Figura 2.4: Evolução das publicações das principais áreas a cada ano

De maneira complementar, a Figura 2.4 apresenta a evolução das publicações de cada área de pesquisa por ano. Verifica-se que o primeiro artigo publicado, em 1968, está associado à *Business & Economics*. Além disso, a partir de 1971 esta área registra publicações em todos os anos, chegando a 83 *papers* em 2014. Contudo, *Operations Research & Management Science*, *Computer Science* e *Engineering* têm demonstrado crescimento mais intenso a partir dos anos 2000. Em 2008, as três áreas já haviam superado 110 publicações anuais, o que ajuda a explicar a liderança apresentada na Tabela 2.7.

Entretanto, *Operations Research & Management Science*, *Computer Science* e *Engineering* têm demonstrado crescimento mais intenso a partir dos anos 2000. Em 2008, as três áreas já haviam superado 110 publicações anuais, o que ajuda a explicar a liderança apresentada na Tabela 2.7.

No que diz respeito a publicações específicas da área de Transporte, o primeiro artigo é de 1973, mas só a partir de 1984 encontram-se registros de publicações anuais. Em 2013 as publicações superaram a marca de 50 artigos por ano, chegando a 67 em 2017. Além disso, é possível determinar quais os *journals* mais relevantes da área, por concentrarem os maiores volumes de publicação (Tabela 2.8).

Tabela 2.8: Principais *journals* que publicam sobre o tema localização de facilidades

Posição	Volume de publicação	ISSN	Journal	Editora
1º	468	0377-2217	European Journal of Operational Research	Elsevier
2º	271	0305-0548	Computers & Operations Research	Elsevier
3º	151	0254-5330	Annals of Operations Research	Springer
4º	146	0360-8352	Computers & Industrial Engineering	Elsevier
5º	120	0160-5682	Journal of the Operational Research Society	Springer
6º	93	1366-5545	Transportation Research Part E	Elsevier
7º	85	0041-1655	Transportation Science	Informa - PubsOnline
8º	83	0030-364X	Operations Research	Informa - PubsOnline
9º	74	0028-3045	Networks	Wiley
10º	70	0925-5273	International Journal of Production Economics	Elsevier
11º	70	1366-588X	International Journal of Production Research	Taylor & Francis Online
12º	65	0167-6377	Operations Research Letters	Elsevier
13º	62	0166-218X	Discrete Applied Mathematics	Elsevier
14º	59	0025-5610	Mathematical Programming	Springer
15º	58	0016-7363	Geographical Analysis	Wiley
	58	0894-069X	Naval Research Logistics	Wiley

O *European Journal of Operational Research* se destaca com 468 artigos, seguido pela *Computers & Operations Research* (com 271) e *Annals of Operations Research* (com 151). Ainda, há cinco revistas diretamente relacionadas à Pesquisa Operacional e duas ao Transporte, reforçando o interesse destas áreas pelo tema desenvolvido na presente pesquisa. Além dos *journals*, é possível identificar as publicações com maior número de citações (Tabela 2.9).

Tabela 2.9: Quinze artigos mais citados na área

Posição	Autor	Ano	Título	Journal	Citações	Objetivo principal
1º	Melo, M. T.; Nickel, S.; Saldanha-da-Gama, F.	2009	Facility location and supply chain management - A review	European Journal of Operational Research	624	Apresentam uma revisão de literatura sobre modelos de localização de facilidades no contexto do gerenciamento da cadeia de suprimentos.
2º	Erlenkotter, D.	1978	Dual-based procedure for uncapacitated facility location	Operations Research	503	Desenvolve um método para o problema de localização de facilidades não-capacitado, baseado em programação linear dual.
3º	Owen, S. H.; Daskin, M. S.	1998	Strategic facility location: A review	European Journal of Operational Research	483	Apresentam um panorama das pesquisas sobre localização de facilidades (especialmente, problemas estocásticos e dinâmicos)
4º	Feo, T. A.	1989	A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem	Operations Research Letters	430	Apresenta uma heurística probabilística para o problema de cobertura.
5º	Shehory, O; Kraus, S.	1998	Methods for task allocation via agent coalition formation	Artificial Intelligence	425	Apresentam diferentes métodos de solução para o problema de alocação de tarefas entre agentes autônomos.
6º	ReVelle, C. S.; Swain, R. W.	1970	Central facilities location	Geographical Analysis	377	Apresentam uma formulação para o problema de localização de facilidades centrais.
7º	Campbell, J. F.	1994	Integer programming formulations of discrete hub location-problems	European Journal of Operational Research	366	Apresenta modelos matemáticos que lidam com quatro tipos de problemas de localização discretos: <i>p-hub</i> mediana, <i>hub</i> não-capacitado, <i>p-hub</i> center e cobertura de <i>hub</i> .
8º	Fleischmann, M.; Krikke, H. R.; Dekker, R.	2000	A characterisation of logistics networks for product recovery	Omega	360	Investigam o <i>design</i> de redes logísticas voltadas para recuperação de produtos.

Tabela 2.9 Quinze artigos mais citados na área (continuação)

Posição	Autor	Ano	Título	Journal	Citações	Objetivo principal
9 <sup>o</sup>	Nagy, G.; Salhi, S.	2006	Location-routing: Issues, models and methods	European Journal of Operational Research	350	Fazem um <i>survey</i> dos modelos de localização-roteamento, ou seja, que consideram critérios de roteamento na definição da localização (apresentando algoritmos exatos e heurísticos)
10 <sup>o</sup>	Beasley, J. E.; Chu, P. C.	1996	A genetic algorithm for the set covering problem	European Journal of Operational Research	342	Apresentam um algoritmo genético baseado em uma heurística para problemas de cobertura.
	Fleischmann, M.; Beullens, P.; Bloemhof-Ruwaard, J. M.; Van Wassenhove, L. N.	2001	The impact of product recovery on logistics network design	Production and Operations Management	342	Apresentam um modelo genérico de localização de facilidades avaliando o impacto do fluxo reverso no <i>design</i> de uma rede logística.
11 <sup>o</sup>	Klose, A.; Drexl, A.	2005	Facility location models for distribution system design	European Journal of Operational Research	336	Apresentam o estado da arte de modelos e algoritmos de solução voltados para o problema de localização.
12 <sup>o</sup>	Diening, L.	2004	Maximal function on generalized Lebesgue spaces $L^p(\cdot)$	Mathematical Inequalities and Applications	334	Discorre sobre a função máxima de Hardy-Littlewood no espaço generalizado de Lebesgue $L^p(\cdot)$ .
13 <sup>o</sup>	Kariv, O.; Hakimi, S. L.	1979	Algorithmic approach to network location problems .1. p-centers	SIAM Journal on Applied Mathematics	322	Propõem um algoritmo para lidar com o problema de localização do tipo p-centro.



Tabela 2.9 Quinze artigos mais citados na área (continuação)

<b>Posição</b>	<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Journal</b>	<b>Citações</b>	<b>Objetivo principal</b>
14 <sup>o</sup>	Jain, K.; Vazirani, V. V.	2001	Approximation algorithms for metric facility location and k-median problems using the primal-dual schema and Lagrangian relaxation	Journal of the ACM	316	Apresentam algoritmos de aproximação para o problema de localização de facilidades não-capacitadas e problema de p-mediana.
15 <sup>o</sup>	Alumur, A.; Kara, B. Y.	2008	Network hub location problems: The state of the art	European Journal of Operational Research	312	Fazem um <i>survey</i> sobre os modelos de localização de <i>hubs</i> .

Verifica-se a presença de artigos datados da década de 70, quando o tema começou a ser estudado; bem como inovações trazidas a partir dos anos 2000 e *papers* dedicados à revisão bibliográfica com objetivo de apresentar o estado da arte dos modelos já desenvolvidos. Destaca-se que o artigo mais recente da Tabela 2.9 (publicado em 2009), já ocupa a 1ª posição no *ranking* geral.

Percebe-se, também, que nove dos quinze artigos presentes na Tabela 2.9 foram publicados nas principais revistas indicadas na Tabela 2.8, justificando o destaque e reforçando o interesse destas pelo tema. Ademais, sete deles foram publicados na revista mais relevante sobre o tema: *European Journal of Operational Research*.

Destaca-se que embora Nickel, S. e Saldanha-da-Gama ocupem apenas a 5ª e a 22ª posição no *ranking* parcialmente apresentado na Tabela 2.4, eles assinam o artigo mais citado da área, com 624 menções (quase o dobro de citações do 10º artigo da Tabela 2.9). O mesmo para Daskin, M.S. que ocupa a 22ª colocação, mas é o autor do 3º artigo mais citado na área; Revelle, C.S. na 8ª, com 6º artigo mais citado; Salhi, S. na 13ª com o 9º *paper*; e, Kara, B. Y. na 19ª com o 15º *paper*. Além disso, há autores que não estão entre os vinte e dois principais, mas que assinam trabalhos de referência na área (assim classificados em função do número de citações).

Por fim, a pesquisa cientométrica permitiu a análise das principais palavras-chave presentes nos artigos publicados sobre localização de facilidades A Figura 2.5 apresenta as trinta principais palavras-chave, dentre as quase 1.900 registradas.



Figura 2.5: Principais palavras-chave nas publicações internacionais

Fonte: Elaborado com WordCloud (2018)

Verificam-se tanto palavras relacionadas à classificação do problema (como *facility location* e *hub location*) quanto a técnicas de solução (e.g. *Genetic Algorithm* e *Lagrangian Relaxation*). *Facility location*, *location* (ou *locating*), *approximate algorithm*, *heuristic*, *genetic algorithm* e *integer programming*, foram as palavras mais frequentes com 976, 334, 243, 243, 233, 206 registros, respectivamente.

Além disso, constatou-se que os artigos que mencionam explicitamente critérios ambientais em suas palavras-chave representam apenas 2,8% da base de dados. Destes, apenas 50 *papers* mencionam a palavra “sustentabilidade” (0,7% da base completa). Isso reforça a importância do presente trabalho cujos resultados poderão contribuir para preencher uma lacuna da literatura, já identificada por Arabani e Farahani (2012), Farahani et al. (2013) e Afshari et al. (2014) como desafio atual da área.

As palavras-chave usadas para identificação dos artigos que fazem menção ao aspecto ambiental e que serão tratados no Capítulo 3 estão apresentados na Tabela 2.10. Esclarece-se a existência de palavras indiretamente ligadas ao aspecto ambiental (como *electric vehicle*, *biofuel* e *lignocellulosic biomass*), mas que não foram incluídas nesta tabela porque não têm ligação direta com a localização de facilidades considerando critérios ambientais (e.g. localização de estações de reabastecimento de veículos elétricos ou avaliação da cadeia de suprimentos de biocombustíveis produzidos a partir de biomassa de lignocelulose).

Tabela 2.10: Palavras-chave relacionadas à dimensão ambiental

Grupo	Palavra-chave	Aspecto	
		Ambiental	Social
Emissão	<i>Greenhouse gas emission</i>	x	
	<i>Carbon dioxide emission</i>	x	
	<i>CO<sub>2</sub> emissions</i>	x	
	<i>Carbon policies</i>	x	
	<i>Emission reduction</i>	x	
	<i>Low-carbon economy</i>	x	
	<i>Carbon capture and storage</i>	x	
	<i>Carbon credits</i>	x	
	<i>Carbon dioxide capture and storage</i>	x	
	<i>Carbon dioxide removal</i>	x	
	<i>Carbon emissions-sensitive demand</i>	x	
	<i>Carbon market</i>	x	
	<i>Carbon tax policy</i>	x	
	<i>Carbon-negative energy</i>	x	
	<i>CO<sub>2</sub></i>	x	
	<i>CO<sub>2</sub> capture and storage</i>	x	
<i>CO<sub>2</sub> fixation</i>	x		
<i>Emissions</i>	x		

Tabela 2.10 Palavras-chave relacionadas à dimensão ambiental (continuação)

Grupo	Palavra-chave	Aspecto	
		<i>Ambiental</i>	<i>Social</i>
Emissão	<i>Emissions in production and transportation</i>	x	
	<i>Emissions testing stations location models</i>	x	
	<i>Emissions trading</i>	x	
	<i>Gas emissions</i>	x	
	<i>Green gas</i>	x	
	<i>Low carbon logistics</i>	x	
	<i>Environmental emissions</i>	x	
Energia	<i>Energy consumption</i>	x	
	<i>Energy</i>	x	
	<i>Bioenergy facility</i>	x	
	<i>Bioenergy management</i>	x	
	<i>Bioenergy with carbon capture and storage<sup>(1)</sup></i>	x	
	<i>Energy facilities location</i>	x	
	<i>Energy reduction</i>	x	
	<i>Energy supply chain</i>	x	
	<i>Energy use</i>	x	
<i>Green energy</i>	x		
Resíduos sólidos	<i>Municipal solid waste management</i>	x	
	<i>Recycling network</i>	x	
	<i>Waste</i>	x	
	<i>Waste disposal</i>	x	
	<i>Solid waste management</i>	x	
	<i>Waste allocation</i>	x	
	<i>Municipal waste management</i>	x	
	<i>Municipal waste management plant location</i>	x	
	<i>Recyclable materials</i>	x	
	<i>Recycling collection networks</i>	x	
	<i>Recycling network design</i>	x	
	<i>Waste collection</i>	x	x
	<i>Waste flow</i>	x	
	<i>Waste of electrical and electronic equipment</i>	x	
<i>Waste pickers</i>		x	
<i>Waste wood</i>	x		
<i>Waste-technology compatibility</i>	x		
Logística <sup>(2)</sup>	<i>Green logistics</i>	x	
	<i>Green supply chain</i>	x	
	<i>Green transportation</i>	x	
	<i>Green supply chain management</i>	x	
	<i>Reverse logistics recycling</i>	x	
	<i>Green distribution network</i>	x	
	<i>Green facility location</i>	x	
	<i>Green hub location problem</i>	x	
	<i>Green networking</i>	x	
<i>Green SC</i>	x		

Tabela 2.10 Palavras-chave relacionadas à dimensão ambiental (continuação)

Grupo	Palavra-chave	Aspecto	
		<i>Ambiental</i>	<i>Social</i>
Logística <sup>(2)</sup>	<i>Green supply chain design</i>	x	
	<i>Green supply chain network</i>	x	
	<i>Green supply chain network design</i>	x	
Uso do solo	<i>Land use</i>	x	
	<i>Land use planning</i>	x	
	<i>Land use management</i>	x	
	<i>Land-use policy</i>	x	
Água	<i>Water quality</i>	x	
	<i>Water footprint</i>	x	
	<i>Water management</i>	x	
Biodiversidade	<i>Biodiversity conservation</i>	x	
	<i>Biodiversity protection</i>	x	
	<i>Environmental diversity</i>	x	
ACV <sup>(3)</sup>	<i>Life cycle assessment</i>	x	x
	<i>Life cycle analysis</i>	x	x
	<i>Waste-to-energy</i>	x	
Mudança climática	<i>Climate change</i>	x	
	<i>Climate-change policy</i>	x	
Segurança	<i>Environmental accidents</i>	x	
	<i>Environmental disaster</i>	x	
	<i>Toxic hazards</i>	x	
	<i>Toxic release</i>	x	
Performance <sup>(4)</sup>	<i>Eco-efficiency</i>	x	
	<i>Environmental and social assessment</i>	x	x
	<i>Environmental assessment</i>	x	
	<i>Environmental classification</i>	x	
	<i>Environmental criteria</i>	x	
	<i>Environmental impact assessment</i>	x	
	<i>Environmental management</i>	x	
	<i>Social impact</i>		x
<i>Social impact coefficient</i>		x	
Meio ambiente	<i>Environment</i>	x	
	<i>Environmental justice</i>	x	x
	<i>Environmental cost</i>	x	
	<i>Environmental planning</i>	x	
	<i>Environmental design</i>	x	
	<i>Environmental engineering</i>	x	
	<i>Environmental equity</i>	x	
	<i>Environmental injustice</i>	x	x
	<i>Environmental insights</i>	x	
	<i>Environmental niche models</i>	x	
	<i>Environmental policy</i>	x	
<i>Environmental protection</i>	x		

Tabela 2.10 Palavras-chave relacionadas à dimensão ambiental (continuação)

Grupo	Palavra-chave	Aspecto	
		<i>Ambiental</i>	<i>Social</i>
Meio ambiente	<i>Environmental racism</i>	x	x
	<i>Environmental regulations</i>	x	
	<i>Environmental studies</i>	x	
	<i>Environmental surrogacy</i>	x	
	<i>Environmental tax</i>	x	
	<i>Environmentally sound technologies</i>	x	
	<i>European environmental policies</i>	x	
Sustentabilidade	<i>Sustainable development</i>	x	x
	<i>Sustainable supply chain</i>	x	x
	<i>Sustainable facility location allocation</i>	x	x
	<i>Sustainable manufacturing</i>	x	x
	<i>Sustainable operations</i>	x	x
	<i>Sustainable supply chain management</i>	x	x
	<i>Sustainability assessments</i> <sup>(5)</sup>	x	x
	<i>Sustainability dimensions</i>	x	x
	<i>Sustainability performance scoring</i>	x	x
	<i>Sustainable facility location</i>	x	x
	<i>Sustainable optimization</i>	x	x
	<i>Sustainable planning</i>	x	x
	<i>Environmental sustainability</i>	x	x
<i>Social sustainability</i>	x	x	

Notas: (1) Também pode estar relacionado ao grupo “emissões”; (2) Especificamente, logística reversa ou verde (3) ACV - Análise do Ciclo de Vida ; (4) *Performance* = Avaliação de desempenho; (5) Também pode estar relacionado ao grupo “avaliação de desempenho”

Uma vez apresentado como o refinamento ambiental que permitiu o desenvolvimento das análises do Capítulo 3 (Etapa 5 da Figura 2.1), a Seção 2.2 faz um fechamento deste capítulo apresentando a evolução temporal das publicações que relacionam meio ambiente ao tema localização de facilidades.

## 2.2 Considerações preliminares sobre a produção científica de localização de facilidades e meio ambiente

A distribuição temporal da publicação dos artigos cujas palavras-chave estão mencionadas na Tabela 2.10 está apresentada na Figura 2.6. Nota-se que a incorporação de critérios ambientais é recente, tendo em vista que a primeira publicação

sobre o tema data de 1968 (Figura 2.2) e o primeiro artigo indexado com uma palavra-chave que remete diretamente ao critério ambiental só foi registrado em 1995, 27 anos depois.

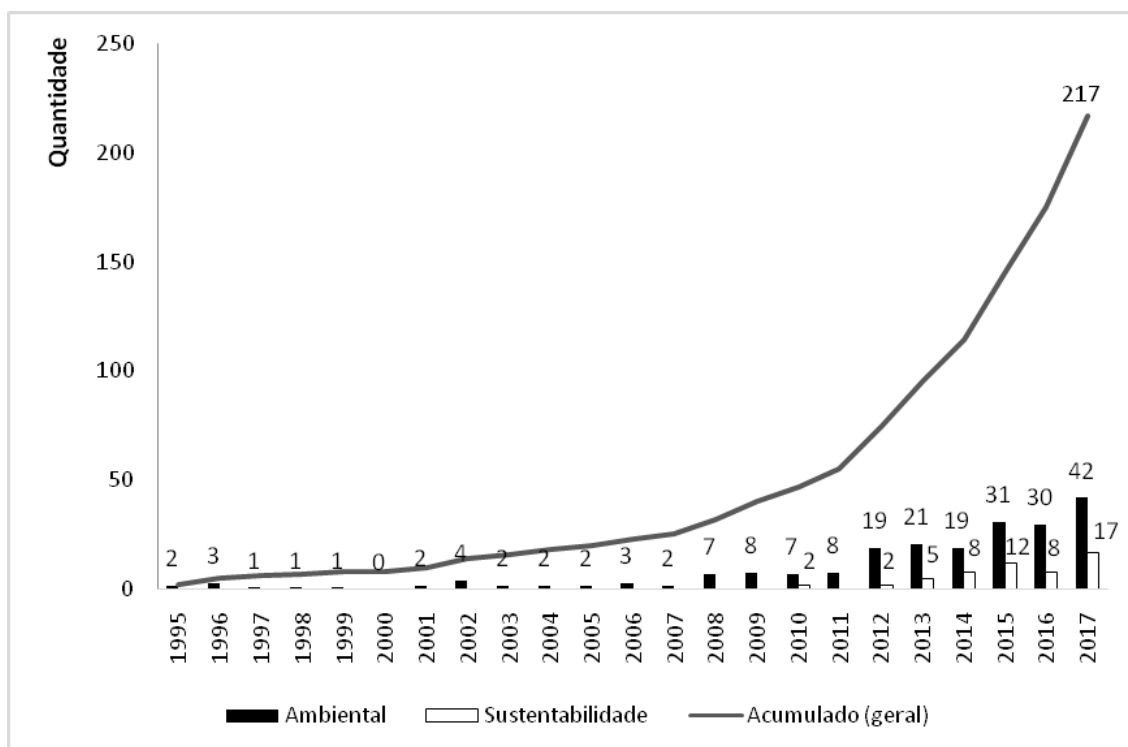


Figura 2.6: Evolução das publicações sobre meio ambiente a cada ano

Percebe-se uma intensificação dos estudos incorporando critérios ambientais a partir de 2012, embora eles ainda representem pouco da produção total sobre o tema (6,6% no ano de 2017, e.g.). A linha apresenta o crescimento acumulado das publicações considerando palavras-chave ambientais, demonstrando uma tendência de crescimento. Isso pode ser explicado pela intensificação nas pesquisas e discussões voltadas para a preservação ambiental (muito motivada por fóruns internacionais, como a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, conhecida como Rio+20<sup>1</sup>) e pelo reconhecimento de que a adoção de critérios ambientais nas operações é um passo na direção do desenvolvimento sustentável.

Enfatiza-se, entretanto, que dos *papers* apresentados na Tabela 2.9 apenas Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009) mencionam aspectos ambientais em sua análise; nenhum dos demais lida com esta dimensão. Contudo, os autores apresentam uma revisão de literatura sobre o tema, não incorporando diretamente tais elementos no processo de tomada de decisão nem propondo um modelo que incorpore parâmetros

<sup>1</sup>Destaca-se que emergem de tais fóruns tratados internacionais, como a Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris. Detalhes sobre cada um dos tratados podem ser encontrado na página das *United Nations - Climate Change* em: <https://unfccc.int/>

e/ou variáveis ambientais.

Ainda, é possível verificar que trabalhos mencionando especificamente o termo “sustentabilidade” começaram a ser publicados a partir de 2010 (sem registros apenas em 2011). Isto reforça a necessidade de estudos que possam contribuir para que a produção científica da área evolua na direção de modelos mais sustentáveis, ainda que seja por meio do estudo dos impactos ambientais e sociais isoladamente, de maneira que possam ser tratados, conjuntamente, em pesquisas futuras.

No que diz respeito ao contexto brasileiro, os estudos desenvolvidos na presente tese deram origem ao artigo de Guimarães, Ribeiro e Azevedo-Ferreira (2018), o qual se recomenda a leitura para melhor compreensão da produção científica sobre o tema no país.

Ressalta-se que, tanto no âmbito internacional quanto no nacional, a preocupação com a inclusão da dimensão ambiental nas discussões sobre localização de facilidades é recente. Contudo, a pesquisa cientométrica não permite avaliar como esta dimensão tem sido tratada e se, de fato, ela tem sido incorporada na modelagem matemática. Para tanto, faz-se necessária uma revisão sistemática dos artigos identificados por meio da cientometria, cujas palavras-chave sugerem a investigação de critérios ambientais.

Assim, uma vez apresentado o panorama da produção científica sobre o tema, o Capítulo 3 está dedicado à análise dos modelos matemáticos que incorporem parâmetros e/ou variáveis ambientais em suas funções objetivos e/ou restrições, de maneira a criar embasamento teórico suficiente para o desenvolvimento do modelo matemático proposto nesta tese.



## Capítulo 3

# Modelagem matemática sobre localização de facilidades e meio ambiente

Com intuito de dar suporte ao desenvolvimento do objetivo principal deste trabalho, o presente capítulo visa identificar como a literatura sobre localização de facilidades tem lidado com os aspectos ambientais na modelagem matemática. No Capítulo 2 constatou-se que apenas 2% dos artigos que compõem a base de dados da *WoS* sobre o tema têm palavras-chave relacionadas à dimensão ambiental. Entretanto, o panorama apresentado não permite compreender se, de fato, esta dimensão vem sendo tratada nos modelos matemáticos ou apenas discutida na revisão de literatura.

Portanto, este capítulo busca compreender quais os critérios ambientais mais estudados e como estes são tratados na literatura existente (e.g. se estão incorporados na modelagem matemática, seja na função objetivo e/ou nas restrições). Esta etapa é importante para o embasamento e o desenvolvimento da modelagem desta tese.

Assim, a partir da pesquisa cientométrica apresentada na Seção 2.1, foram feitos dois recortes (Etapas 5 e 6 da Figura 2.1). Inicialmente, selecionaram-se os artigos que continham palavras-chave associadas explicitamente à dimensão ambiental ou à sustentabilidade (conforme apresentado na Tabela 2.10). Como resultado desta etapa, tem-se a Tabela A.1 (disponível no Apêndice A).

Em seguida, estes *papers* foram lidos com intuito de filtrar apenas aqueles que tivessem aderência à proposta da tese. Para tanto, foram identificados quais abordam critérios ambientais no processo de otimização, restringindo o grupo de análise. Adicionalmente, optou-se por analisar todos os artigos com enfoque em sustentabilidade, para compreender se estes, de fato, adotam critérios sociais, econômicos e ambientais, de maneira conjunta, na modelagem - conforme sugerido pelo conceito

tradicional proposto pelo WCED (1987).

Com isso, avaliou-se a possibilidade de estender a proposta do modelo desenvolvido na presente pesquisa, incorporando também a dimensão social (ou seja, ampliando seu escopo para um modelo sustentável de localização de CILs). A pesquisa, no entanto, ratificou a dificuldade em se mensurar a dimensão social, evidenciando que poucos trabalhos a avaliam, de fato; e quando o fazem, adotam critérios que não, necessariamente, refletem o impacto das operações.

Mas, antes de apresentar o mapeamento desenvolvido na Seção 3.1, faz-se necessário discorrer sobre os impactos ambientais associados à localização de facilidades e, transversalmente, ao transporte. Por meio da identificação de tais impactos, facilita-se a compreensão sobre como os parâmetros associados ao aspecto ambiental estão influenciando as estratégias de localização de facilidades e quais deles são mais recorrentes nos modelos matemáticos.

De acordo com Kizilboga et al. (2013), inicialmente, a proposição de ações *eco-friendly* foi motivada pela escassez de recursos, e não por preocupações genuínas com o meio ambiente ou com o desenvolvimento sustentável. Corroborando este ponto de vista, Brandenburg (2015) assinala que, em um dado momento, percebeu-se que considerar os aspectos ambientais (e sociais) nos processos poderia impactar positivamente a lucratividade, inovação e posicionamento competitivo de diferentes indústrias.

No entanto, atualmente, observa-se uma crescente pressão feita por diferentes *stakeholders* - dos mais diversos segmentos - que tem promovido a criação tanto de políticas públicas voltadas para redução dos impactos ambientais negativos, quanto práticas “inovadoras” de gestão (Betts, Wiengarten e Tadisina, 2015; Weng, Chen e Chen, 2015; Omar e Othman, 2016; Zhang e Zu, 2019).

Abdallah et al. (2012), por exemplo, aponta que o *trade-off* entre custo e emissões já vem sendo levado em conta no processo de seleção de fornecedores em algumas indústrias, indicando uma postura mais inovadora no gerenciamento da cadeia de suprimentos. Ainda, de acordo com Afshari et al. (2014), as empresas têm começado a considerar os custos das externalidades logísticas, como: alteração do clima, poluição do ar, ruído, vibração e acidentes<sup>1</sup>.

No que diz respeito especificamente à localização de facilidades, os impactos ambientais podem variar em função do tipo de facilidade a ser instalada, dos modos de transporte que servem esta estrutura, do tipo de carga movimentada, do tipo de tecnologia empregada etc. Além disso, sua magnitude será diferente, dependendo

---

<sup>1</sup>Ressalta-se não haver consenso na literatura sobre a classificação deste item. Ele pode estar tanto associado à dimensão ambiental (ao se considerar, por exemplo, acidentes que envolvem carga de produtos perigosos e/ou contaminantes (Leal Jr, 2010; Guimarães, Leal Jr e Silva, 2018) quanto à social (no que diz respeito aos impactos dos acidentes na vida da população, no uso do Sistema Único de Saúde etc.)

da fase do empreendimento avaliado: construção, operação ou desmobilização.

A Tabela 3.1 sintetiza os principais impactos ambientais (encontrados na literatura de transporte e adaptados para o contexto de facilidades) e as ações de mitigação, que poderiam ser incluídos nos modelos matemáticos. Ressalta-se que a relevância de cada um desses impactos no processo de localização dependerá do tipo de facilidade e suas características físico-operacionais, bem como do escopo da avaliação.

Entende-se, que uma estrutura simplificada, que permita unicamente a consolidação da carga visando à intermodalidade (como nesta tese) está sujeita a impactos diferentes de uma plataforma logística, por exemplo. Esta oferece uma maior variedade de serviços e agregação de valor e, até mesmo, áreas de apoio destinada a usuários e operadores. Para melhor compreensão das tipologias de estruturas de integração logística (bem como as nuances associadas aos tipos de serviço oferecido e valor adicionado), sugere-se a leitura do documento desenvolvido por Higgins e Ferguson (2011).

De maneira a lidar com os impactos descritos na Tabela 3.1, a literatura pesquisada indica a adoção das seguintes políticas e ações de mitigação: (i) políticas de regulação da emissão de carbono (*carbon tax*, *carbon cap* e *carbon cap-and-trade*); (ii) inventário de emissões (GEEs e poluentes) e pegada de carbono, bem como ações - na infraestrutura de transporte, tecnologia do veículo, gestão etc, visando a redução das emissões mencionadas; (iii) uso de combustíveis renováveis (e.g. etanol, eletricidade, biocombustíveis); (iv) melhoria dos sistemas e da tecnologia visando operações mais energo-eficientes; (v) 3R - reduzir, reciclar e reutilizar; (vi) tratamento e destinação adequada dos resíduos; (vii) logística reversa e programas de gestão de resíduos (e.g. consórcios regionais); (viii) política *e-waste*<sup>2</sup>; (ix) uso de tecnologias de menor impacto sonoro; (x) alteração no *design* dos veículos para aumento da eficiência energética; (xi) estabelecimento de parques eco-industriais e simbiose; (xii) pegada hídrica; e, (xiii) aplicação da ACV.

Esclarece-se que não se tem como intuito abordar cada uma dessas técnicas na presente tese, portanto, o parágrafo anterior buscou tão somente mencionar algumas ações abordadas na literatura especializada para lidar com os diferentes tipos de

---

<sup>2</sup>Faz parte da política de gerenciamento de resíduos da União Europeia, a qual é focada especificamente em eletro-eletrônicos. Além de restringir a quantidade de substâncias perigosas permitidas nos equipamentos - visando facilitar o processo de reciclagem e proteger a saúde humana - também são estabelecidas metas relacionadas ao volume de equipamentos no final da vida útil (resíduos) que devem ser recolhidos e reciclados pelos Estados-Membros. Enfatiza-se, no entanto, que a responsabilidade por coletar, reciclar e/ou destinar adequadamente os resíduos é do fabricante. Como reflexo, pode-se encontrar no site da *Huawei* indicações ao consumidor sobre como proceder com o descarte do produto ao final da vida útil, instruindo-o a não descartá-lo no lixo comum, mas a procurar centros de coleta autorizados (Huawei, 2019). Sugere-se a leitura de Islam e Huda (2018), que apresenta uma revisão de literatura sobre cadeia de suprimentos fechadas e logística reversa focado no caso dos materiais eletro-eletrônicos (*e-waste*).

impactos ambientais presentes na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Impactos ambientais relacionados à localização de facilidades e ações de mitigação encontradas na literatura

<b>Impactos</b>	<b>Descrição</b>
Poluição atmosférica	Emissão de gases relacionados à queima de combustível (na operação da facilidade ou no transporte), cujos impactos são locais (monóxido de carbono - CO, óxidos de nitrogênio - NO <sub>x</sub> , hidrocarbonetos - HC, material particulado - MP e aldeídos) ou regionais (como óxidos de enxofre - SO <sub>x</sub> e nitrogênio - NO <sub>x</sub> ).
Emissão de GEE	Emissão de gases relacionados à queima de combustível (na operação da facilidade ou no transporte), cujos impactos são globais (dióxido de carbono - CO <sub>2</sub> , metano - CH <sub>4</sub> , óxido nitroso - N <sub>2</sub> O, vapor de água e clorofluorcarbonetos - CFC).
Uso de energia	Resultado do consumo de combustível nas operações da facilidade e do transporte, cujos impactos podem ser segregados de acordo com a fonte (renovável ou não renovável).
Consumo de material	Material consumido na construção e operação da facilidade, variando de acordo com o tipo de carga movimentada, alternativas de transporte usadas, grau de transformação do produto, tipo de tecnologia empregada etc.
Poluição sonora	Ruído relacionado à operação da facilidade e ao transporte (e.g. operação dos motores dos veículos, sinais sonoros etc.).
Poluição térmica	Proveniente da operação da facilidade (especialmente quando envolve a produção ou transformação de um insumo e.g. - transformação da soja em farelo e óleo de soja) ou veículos, causando o aquecimento dos ecossistemas.
Poluição visual	Relacionado diretamente ao uso da terra, está associado ao espaço geográfico ocupado pela facilidade e pelo sistema de transporte que a serve, podendo modificar e/ou descaracterizar a paisagem local.
Poluição da água e do solo	Emissão de resíduos sólidos e líquidos provenientes da operação das facilidades e do transporte. Pode envolver, também, a destinação final de materiais, equipamentos e veículos ao final do ciclo de vida. Dependendo do tipo de carga movimentada (e.g. produtos perigosos), um acidente pode causar este tipo de poluição.
Consumo de água	Considera o consumo de água tanto na operação das facilidades quanto na manutenção dos veículos.

Dentre os impactos apresentados na Tabela 3.1, a emissão de GEEs é o mais abordado (Ghaddar e Naoum-Sawaya, 2011; Abdallah et al., 2012; Mohammadi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam, 2014; Brandenburg, 2015; Eskandarpour et al., 2015; Fahimnia e Jabbarzadeh, 2016) - como será corroborado ao longo deste capítulo. Isto se justifica pelo fato da emissão de CO<sub>2</sub>, principal GEE, ser comum a qualquer facilidade, estando presente nas fases de construção, operação (incluindo estocagem, transporte, movimentação etc.) e descomissionamento, quando aplicável.

Além disso, organizações nacionais e internacionais têm implementado metas de redução das emissões de GEEs motivadas por tratados internacionais, como o protocolo de Kyoto (Diabat et al., 2013), o que acaba fomentando estudos sobre o tema. De acordo com Wanke (2015), os protocolos de Montreal<sup>3</sup> e Kyoto<sup>4</sup> são reconhecidos por terem estabelecido metas mais abrangentes para os limites de emissão atmosférica, incluindo, por exemplo, aquelas relacionadas às operações logísticas.

Como resultado, várias instituições desenvolveram protocolos para contabilizar a emissão de CO<sub>2</sub> de maneira a auxiliar as organizações na determinação de suas pegadas de carbono (Bojarski et al., 2009). Citam-se, por exemplo, os documentos publicados pelo *World Resources Institute* - WRI em conjunto com o *World Business Council for Sustainable Development* - WBCSD em 2006 e 2008, sendo que o primeiro desenvolve uma ferramenta para contabilizar a emissão de GEEs (WRI e WBCSD, 2006) e o segundo apresenta diretrizes para captura e armazenamento de carbono (WRI e WBCSD, 2008). No documento de 2006, o instituto ratifica a afirmação de Bojarski et al. (2009) ao indicar que diferentes programas têm sido desenvolvidos para contabilizar e gerenciar as emissões empresariais de GEEs, com diferentes abrangências geográficas (de local a internacional).

Reconhecido como padrão internacional, o documento *Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard* (WRI e WBCSD, 2004) serviu como base para o desenvolvimento da ISO 14064-1<sup>5</sup> (publicada em 2006 e atualizada em 2018), que especifica como as organizações devem quantificar e reportar a emissão de GEEs, ou seja, regulamenta a elaboração do inventário corporativo de emissões (ISO, 2018). Adicionalmente, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2007), a ISO 14064 pode ser usada como suporte à gestão de riscos corporativos, à iniciativas voluntárias de registro de emissão de GEEs, à participação em mercados de crédito de carbono e à elaboração de relatórios para

---

<sup>3</sup>Em 1985 foi instituída a Convenção de Viena, a qual estabeleceu uma série de princípios visando promover mecanismos de proteção ao ozônio que deveriam ser seguidos pelos governos participantes. Motivados pela convenção, em 1987, iniciaram-se as discussões sobre o tratado que ficou conhecido como Protocolo de Montreal. Com vigência a partir de 1989, este protocolo estabeleceu metas de redução progressiva da produção e consumo de substâncias que causam depleção da camada de ozônio. Para maiores informações, recomenda-se a leitura do Decreto 99.280/1990 que dispõe sobre a adesão do Brasil ao Protocolo de Montreal (Brasil, 1990).

<sup>4</sup>Adotado em 1997, mas em vigor desde 2005, o Protocolo de Kyoto é um acordo internacional vinculado à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, que estabelece metas internacionais para a redução de emissões de GEEs (United Nations, 2019). Com escopo mais abrangente que o Protocolo de Montreal, as metas envolvem as emissões associadas as seguintes gases: dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>; metano - CH<sub>4</sub>; óxido nitroso - N<sub>2</sub>O; ; HFCs; perfluorocarbonos - PFCs; e, hexafluoreto de enxofre - SF<sub>6</sub>.

<sup>5</sup>No contexto brasileiro, a ABNT fez a acreditação das normas ISO 14064, partes 1 a 3. A primeira parte discorre sobre a elaboração do inventário corporativo de emissões de GEEs (planejamento, desenvolvimento e monitoramento). A segunda se concentra em diretrizes voltadas especificamente para projetos visando a redução das emissões de GEEs, enquanto a terceira apresenta orientações para validação de inventários de GEEs. Maiores informações em ISO (2018).

organismos reguladores e/ou governo.

De acordo com Eskandarpour et al. (2015), a pegada de carbono é uma das métricas mais populares para mensurar os impactos ambientais em cadeias de suprimentos. Neste contexto, muitos governos têm proposto ações visando a restringir e/ou mitigar as emissões, além de estabelecer mecanismos para viabilizar o comércio de carbono (Bojarski et al., 2009; Abdallah et al., 2012; Diabat et al., 2013; Zhalechian et al., 2016). Dentre as políticas regulatórias, destacam-se: *carbon tax*, *carbon cap* e *carbon cap-and-trade*.

A política *carbon tax* estabelece que as organizações devem pagar por cada tonelada de carbono emitida, não havendo, porém limitações quanto à quantidade máxima. Acredita-se que o “incentivo” financeiro, em si, contribuiria para a redução das emissões (Bojarski et al., 2009).

Na política *carbon cap*, por sua vez, cada firma tem um “*cap*” - que pode ser entendido como a quantidade máxima de carbono que é permitida a emitir. Note que as emissões feitas dentro deste limite são livres de taxaço, entretanto, é estritamente proibido exceder tal limite em qualquer operação. Em consonância com Ghaddar e Naoum-Sawaya (2012), entende-se que o mecanismo *carbon cap* possa estar relacionado tanto a uma política governamental (legislação que restrinja as emissões de determinado setor ou segmento) quanto a uma política empresarial (metas internas estabelecidas no planejamento estratégico organizacional).

Como uma combinação das políticas anteriores, há a *carbon cap-and-trade*, em que a organização que exceder seu limite de emissões (*cap*) deve comprar créditos extras para cobrir o excesso, ao passo que empresas podem vender os créditos não usados (*trade*). De acordo com Bojarski et al. (2009), isso incentivaria as empresas a operar abaixo do limite máximo e, ao mesmo tempo, seria uma fonte de renda extra encorajando maiores reduções nos níveis de emissão. Abdallah et al. (2012) aponta o mecanismo de comércio de carbono como uma das principais inovações da política ambiental<sup>6</sup>

Esclarece-se, no entanto, que o mercado de carbono ainda não está regulamentado, no Brasil. O Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável - CEBDS desenvolveu o estudo “Precificação de Carbono na Indústria Brasileira”, apresentado ao Ministério da Fazenda em 2018, com propósito de demonstrar a viabilidade da implementação futura do comércio de carbono no país (CEBDS, 2018), porém, nenhuma regulamentação fora feita até a finalização da presente tese.

Uma vez apresentada uma breve reflexão sobre os impactos ambientais associados a facilidades, a Seção 3.1 discorre sobre o mapeamento da literatura sobre localização

---

<sup>6</sup>Detalhes sobre o funcionamento da política *cap-and-trade* na União Europeia podem ser encontrados em: [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en). Sugere-se, também, o relatório da União Europeia, lançado em 2017, que versa sobre o funcionamento do mercado de carbono na Europa (Europe Union, 2017).

de facilidades, cujos modelos matemáticos incorporam a dimensão ambiental (seja nas restrições, seja na função objetivo ou em ambas), de maneira conjunta ou isolada com outros aspectos.

### 3.1 Mapeamento da literatura sobre localização de facilidades e meio ambiente

Com base nos 217 artigos com viés ambiental e/ou sustentável presentes na base de dados da *WoS*, foram analisados os 129 encontrados disponíveis para leitura durante esta etapa da pesquisa. Ressalta-se que, com exceção dos trabalhos de Li et al. (2016) e Olapiriyakul (2017) que não estavam disponíveis para *download*, todos os artigos que mencionavam explicitamente o termo “sustentabilidade”, dentre as palavras-chave, foram contemplados.

Os artigos selecionados foram publicados em 64 diferentes *journals*, com destaque para: *Journal of Cleaner Production* (8 artigos), *Transportation Research Part E* (7), *Applied Energy* (5), *International Journal of Production Research* (5), *European Journal of Operational Research* (4), *International Journal of Production Economics* (4), *Omega* (4), *Transportation Research Part D* (3) e *Waste Management* (3). Ainda, constam publicações em 18 conferências internacionais e um relatório de pesquisa.

A Tabela A.1 (disponível no Apêndice A) apresenta uma consolidação dos artigos analisados, evidenciando os objetivos de cada um dos trabalhos. Verifica-se que nem todos os *papers* aplicam e desenvolvem modelos matemáticos de otimização; às vezes, são adotadas técnicas multicritérios, como Análise Hierárquica de Processos - AHP (e.g. Fard, Kibert e Chini, 2015 e Tavares et al., 2011) e *Elimination et Choix Trafuisant la Réalité* - ELECTRA (Govindan et al., 2016). Além disso, a análise contempla diferentes áreas, embora o viés seja predominantemente privado, com enfoque em cadeia de suprimentos.

No entanto, mesmo que os artigos tenham palavras-chave ambientais como termos de indexação, alguns não contemplam ou analisam a dimensão ambiental, de fato (e.g. Bapna, Takur e Nair, 2002). Isso ocorre, por exemplo, em casos nos quais o trabalho adota critérios tradicionais de localização (custo e tempo), mas a aplicação ou o estudo de caso remete à redução, ainda que indireta, dos impactos ambientais (e.g. reciclagem, destinação adequada de produtos perigosos ou estações de abastecimento de combustíveis com menor teor de chumbo). Em outras palavras, os autores definiram palavras-chave que sugerem a incorporação da dimensão ambiental nos critérios de localização, mas quando o modelo fora investigado, percebeu-se que não era o caso.

Outros trabalhos, por sua vez, não têm como viés principal de análise a localização de facilidades (como Kuby, Middleton e Bielicki, 2011; Han et al., 2012; Taniguchi, Thompson e Yamada, 2014 e Kramers et al., 2015). Alguns, ainda, têm enfoque em áreas diferentes da logística, especialmente telecomunicações (Heikkinen, 2011 e Larumbe e Sansò, 2012).

A partir da análise da Tabela A.1, foram selecionados aqueles artigos considerados de maior aderência ao contexto da presente pesquisa. Assim, verificou-se que apenas 45 *papers* lidam com a localização de facilidades verdes (considerando o aspecto ambiental) ou sustentáveis (adotando critérios sociais e ambientais), os quais foram avaliados e tiveram suas principais características consolidadas nas Tabelas 3.2 e 3.3. Ressalta-se que os artigos de Chen, Olhager e Tamg (2014) e Eskandarpour et al. (2015) foram removidos destas tabelas por serem de revisão de literatura.

A Tabela 3.2 se dedica ao estudo, especificamente, dos modelos matemáticos desenvolvidos, evidenciando: o tipo de modelo - sendo, apenas um objetivo (O), bi-objetivo (B) e multiobjetivo (M); os objetivos de otimização; as decisões envolvidas; e se os parâmetros são determinísticos (D) ou estocásticos (E). A Tabela 3.3, por sua vez, consolida as principais características do estudo de caso, indicando, por exemplo, os critérios ambientais analisados e as alternativas de transporte consideradas - sendo, rodoviária (R), ferroviária (F), aquaviária (Aq), aérea (Ae), dutoviária (D) ou, ainda, não especificada (-).

Ainda na Tabela 3.3, no que diz respeito às facilidades indicadas para localização, esclarece-se que, quando há menção a “cadeia de suprimentos”, significa que alguma(s) facilidade(s) da cadeia era(m) alvo(s) da análise (e.g. fábricas, centros de distribuição etc.). Além disso, a coluna C/S indica se, no *paper*, são feitas análises de cenário e/ou sensibilidade (C/S).

Nota-se que a maioria dos artigos foi publicada em 2015 (26,67%), em periódicos internacionais (37 dos 45), com destaque para: *Journal of Transportation Research - Part E* (com 5 *papers*), *Journal of Cleaner Production* (4), *Omega* (3), *Transportation Research* (2) e *International Journal of Production Research* (2).

Cabe ponderar que dos principais *journals* sobre localização de facilidades (apresentados na Tabela 2.8, na Seção 2.1), apenas seis foram usados como veículos das publicações sobre meio ambiente, com destaque para o *Journal of Transportation Research - Part E* que, embora apareça apenas na 6<sup>a</sup> posição da Tabela 2.8, é o que tem mais artigos considerando a dimensão ambiental.



Tabela 3.2: Análise dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis - recorte

<b>Autor</b>	<b>Tipo de modelo</b>	<b>Objetivos de otimização</b>	<b>de Decisões</b>	<b>Multi-produto?</b>	<b>Multi-período?</b>	<b>Multi-camada?</b>	<b>Determ./Estoc.?</b>
Abdallah et al. (2012)	O,B	Custo, emissão de CO <sub>2</sub> e ACV	Localização de facilidades, alocação dos fluxos e emissão de CO <sub>2</sub>	Sim	Não	Sim	D
Accorsi et al. (2015)	B	Custo, inclusive das emissões de CO <sub>2</sub>	Localização das facilidades e alocação dos fluxos	Sim	Não	Sim	D
Alshari et al. (2014)	B	Custo e satisfação do cliente	Localização de armazéns centrais e regionais, alocação dos fluxos	Sim	Sim	Sim	D
Anvari e Turkay (2017)	M	Custo, emissão de carbono, resíduo e impacto social	Localização, alocação e operação das facilidades	Não	Não	Não	E
Bojarski et al. (2009)	M	Valor Presente Líquido - VPL e ACV	Localização, seleção da tecnologia e rede de distribuição	Sim	Sim	Sim	D
Brandenburg (2015)	M	VPL, nível de serviço e emissão de carbono	Uso da facilidade em determinado período e a alocação da rede	Sim	Sim	Sim	D e E
Costa, Duarte e Sarache (2017)	M	Receitas, custos logísticos, emissão de CO <sub>2</sub> , incidentes sociais <sup>1</sup>	Localização das plantas de conversão, alocação dos fluxos	Sim <sup>2</sup>	Sim	Sim	D
Das e Shaw (2017)	O	Custo <sup>3</sup>	Localização de facilidades e alocação dos fluxos	Não	Não	Sim	E
Diabat et al. (2013)	O	Custo, inclusive das emissões de CO <sub>2</sub>	Localização de facilidades e alocação de fluxos	Sim	Não	Sim	D
Elhedhli e Merrick (2012)	O	Custo, inclusive das emissões de CO <sub>2</sub>	Localização dos CDs e alocação dos fluxos	Não	Não	Sim	D

Tabela 3.2 Análise dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis - recorte (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Tipo de modelo</b>	<b>Objetivos de otimização</b>	<b>Decisões</b>	<b>Multi-produto?</b>	<b>Multi-período?</b>	<b>Multi-camada?</b>	<b>Determ./Estoc.?</b>
Erkut et al. (2008)	M	Custo, emissão de GEE, recuperação de energia e material	Localização-alocação e a tipologia das facilidades que receberão os resíduos e a alocação dos fluxos	Não	Não	Sim	D
Falhiminia e Jabbarzadeh (2016)	M	Custo, score ambiental e social	Localização das fábricas e CDs, capacidades, alocação dos fluxos e modos de transporte	Sim	Não <sup>4</sup>	Sim	D
Fareeduddin et al. (2015)	O	Custo, inclusive de CO <sub>2</sub>	Abertura de facilidades da cadeia de suprimentos	Sim	Não	Sim	D
Garg et al. (2015)	B	Lucro, número de caminhões <sup>5</sup>	Número de veículos contratados e fluxo de materiais entre os diferentes elos	Não	Não	Sim	D
Ghaddar e Naoum-Sawaya (2012)	O	Custo e crédito de carbono	Localização das facilidades da rede, alocação dos fluxos e emissão de CO <sub>2</sub>	Não	Não	Não	D
Guyon et al. (2012)	O	Custo, emissão, aceitação da comunidade	Localização de plataformas logísticas em áreas urbanas	Não	Não	Não	D
Hamad e Akbarnezhad (2017)	M	Ruído, tempo de viagem nas adjacências	Localização e cobertura	N/A	Não	Não	D
Harris, Mumford e Naim (2014)	B	Custo e emissão de CO <sub>2</sub>	Localização de facilidades e alocação dos fluxos	Não	Não	Não	D
Jindal e Sangwan (2017)	B	Lucro, impacto ambiental (pegada de carbono)	Fluxo de produtos na cadeia de suprimentos e das facilidades de logística reversa	Sim	Não	Sim	E

Tabela 3.2 Análise dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis - recorte (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Tipo de modelo</b>	<b>Objetivos de otimização</b>	<b>Decisões de</b>	<b>Multi-produto?</b>	<b>Multi-período?</b>	<b>Multi-camada?</b>	<b>Determ./Estoc.?</b>
Kizilboga et al. (2013)	O	Custo, inclusive ambiental	Localização e fração da demanda atendida pelo ponto de serviço	Não	Não	Não	D
Lainez et al. (2008)	B	Categorias de impacto da ACV e VPL	Localização de facilidades e alocação de equipamentos	Não	Não	Sim	D
Liqiang e Guoxin (2015)	O	Custo e emissão de carbono	Localização da refinaria, alternativa de transporte e alocação dos fluxos	Sim	Não	Sim	E
Mohammadi, Torabi e T-Moghaddam (2014)	M	Custo das emissões, do ruído e da rede	Localização dos <i>hubs</i> e alocação dos fluxos	Não	Não	Sim	D e E
Mota et al. (2015a)	B	Lucro e impacto ambiental	Localização e capacidade de facilidades, seleção de fornecedores e da tecnologia de conversão, rede de transporte, produção e recuperação	Sim	Sim	Sim	D
Mota et al. (2015b)	M	Lucro, ACV, empregos gerados	Localização de facilidade, rede de transporte, seleção da tecnologia de conversão, alocação dos fluxos	Sim	Sim	Sim	D
Musavi e Bozorgi-Amiri (2017)	M	Custo, responsividade, emissão de CO <sub>2</sub>	Localização dos <i>hubs</i> , alocação dos fluxos e sequenciamento dos veículos	Não	Não	Sim	D
Niknamfar e Niaki (2016)	B	Custo da rede, do operador e das emissões de CO <sub>2</sub>	Localização dos <i>hubs</i> e alocação dos fluxos (rede <i>hub-and-spoke</i> )	Não	Não	Sim	D
Pati, Vrat e Kuamar (2008)	O	Custo	Localização de facilidades e alocação de fluxos	Sim	Não	Sim	D

Tabela 3.2 Análise dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis - recorte (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Tipo de modelo</b>	<b>Objetivos de otimização</b>	<b>Decisões</b>	<b>Multi-produto?</b>	<b>Multi-período?</b>	<b>Multi-camada?</b>	<b>Determ./Estoc.?</b>
Sedehzadeh et al. (2016)	B	Custo e consumo de energia	Localização e capacidade <i>hubs</i> , alocação dos nós, conexões entre <i>hubs</i> e modo de transporte	Não	Não	Sim	D
Santibañez-Aguilar et al. (2014)	M	Lucro, ACV, empregos gerados	Localização e capacidade das plantas, seleção das tecnologias de processamento	Sim	Sim	Sim	D
Shaw et al. (2016)	O	Custo total, incluindo o carbono	Localização de facilidades e fluxo de materiais	Não	Não	Sim	E
Smith et al. (2014)	B	Lucro e emissão de carbono	Localização de facilidades e fluxo de materiais	Não	Não	Sim	D
Talaei et al. (2016)	B	Custo e emissão de CO <sub>2</sub>	Localização de centros de manufatura/remanufatura, coleta/inspeção	Sim	Não	Sim	D
Tang e Zhang (2015)	M	Custo, emissão de CO <sub>2</sub> , nível de serviço	Localização de facilidades	Não	Não	Não	D
Tian e Liu (2015)	O	Consumo de energia	Localização de estações de inspeção veicular	Não	Não	Não	D
Varsei e Polyakovskiy (2017)	M	Custo, emissão de CO <sub>2</sub> -eq, nível de serviço e impacto social <sup>6</sup>	Localização das facilidades e alocação dos fluxos	Não	Não	Sim	D
Wang et al. (2012)	M	Custo, emissão de CO <sub>2</sub> e geração de resíduos	Localização das facilidades da rede e alocação dos fluxos	Não	Não	Sim	D
Wang et al. (2013)	M	Custo, emissão de CO <sub>2</sub> e geração de resíduos	Localização das facilidades da rede e alocação dos fluxos	Não	Não	Sim	D
Wanke et al. (2015)	O	Custo, inclusive das emissões de CO <sub>2</sub>	Abertura do armazém e alocação da parcela da demanda a eles	Não	Não	Sim	D e E

Tabela 3.2 Análise dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis - recorte (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Tipo de modelo</b>	<b>Objetivos de otimização</b>	<b>Decisões</b>	<b>Multi-produto?</b>	<b>Multi-período?</b>	<b>Multi-camada?</b>	<b>Determ./Estoc.?</b>
Xifeng, Ji e Peng (2013)	M	Custo, emissão de CO <sub>2</sub> , nível de serviço	localização de facilidades	Não	Não	Não	D
You et al. (2012)	M	Custo, emissão de CO <sub>2-eq</sub> , empregos gerados dos fluxos, nível de estoque, capacidade de produção	Localização das facilidades <sup>7</sup> , alocação dos fluxos, nível de estoque, capacidade de produção	Sim	Não	Sim	D
Yu e Solvang (2017)	B	Custo e comércio de carbono ( <i>carbon cap e carbon trade</i> )	Localização das facilidades, quantidade de material reciclado, alocação dos fluxos	Sim	Não	Sim	E
Zhalechian et al. (2016)	M	Custo, impactos ambiental e social	Roteamento, inventário, localização-alocação	Sim	Sim	Sim	E
Zhang et al. (2015)	O	Desutilidade (aversão ao risco)	Localização e tamanho dos parques logísticos	Não	Não	Não	D e E
Zheng e Zhou (2012)	O	Custo, inclusive emissão de CO <sub>2</sub>	Localização de facilidades	Não	Não	Não	D

Notas: (1) Criminalidade e estabilidade política; (2) Biocombustíveis, subprodutos e resíduos; (3) Tratam a dimensão ambiental na restrição; (4) Consideram, no entanto, diferentes cenários de disrupção; (5) Defendem que ao minimizar o número de caminhões contratados para as atividades de fluxo direto na cadeia de suprimentos, reduz-se o impacto ambiental; (6) Emprego e PIB regional; (7) Além de outras variáveis associadas ao *design* da cadeia de suprimentos.

Tabela 3.3: Caracterização dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis

<b>Autor</b>	<b>Critério ambiental</b>	<b>Tipo de facilidade</b>	<b>Produtos</b>	<b>Modos</b>	<b>Interm.?<sup>1</sup></b>	<b>C/S?</b>
Abdallah et al. (2012)	Emissão de CO <sub>2</sub> e outras dimensões do ACV	Cadeia de suprimentos	Computador e componentes	R	Não	Sim
Accorsi et al. (2015)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Cadeia de suprimentos fechada	Móveis	R, F, Aq	Sim	Sim
Afshari et al. (2014)	Peças de <i>recall</i> recicladas	Armazéns centrais e regionais	Peças de automóveis	-	Não	Sim
Anvari e Turkey (2017)	Emissão de carbono, resíduo da operação e da construção	Facilidades, em geral (ex. fábricas)	Produtos digitais	R, F, Aq, Ae	Não	Sim
Bojarski et al. (2009)	Emissões de CO <sub>2</sub> e demais categorias da ACV	Cadeia de suprimentos	Anidrido maleico	-	Não	Sim
Brandenburg (2015)	Emissão de carbono	Cadeia de suprimentos <sup>2</sup>	Cosmético	R, Aq, Ae	Não	Sim
Costa, Duarte e Sarache (2017)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Cadeia de suprimentos	Biodiesel de óleo de palma R	Não	Sim	
Das e Shaw (2017)	Emissão de carbono	Cadeia de suprimentos	N/A	-	Não	Sim
Diabat et al. (2013)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Cadeia de suprimentos fechada	N/A	-	Não	Sim
Elhedhli e Merrick (2012)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Cadeia de suprimentos	Fictício	- <sup>3</sup>	Não	Sim
Erkut et al. (2008)	Emissão de GGE (CO <sub>2</sub> -eq e CH <sub>4</sub> ), resíduos destinada aos aterros sanitários, recuperação de energia e material	Facilidades para o gerenciamento de resíduos sólidos	Resíduos	- <sup>3</sup>	Não	Não
Fahimnia e Jabbarzedeh (2016)	Score ambiental do fornecedor	Cadeia de suprimentos (foco no fornecedor)	Roupas esportivas	R, F, Aq	Não	Sim

Table 3.3 Caracterização dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Critério ambiental</b>	<b>Tipo de facilidade</b>	<b>Produtos</b>	<b>Modos</b>	<b>Interm.?<sup>1</sup></b>	<b>C/S?</b>
Fareeduddin et al. (2015)	Emissão de carbono	Cadeia de suprimentos fechada	N/A	R, F, Aq	Não	Não
Garg et al. (2015)	Pegada de carbono <sup>4</sup>	Cadeia de suprimentos fechada	Aquecedor de água	R	Não	Não
Ghaddar e Naoum-Sawaya (2012)	Emissão de carbono	Facilidades produtivas	N/A	-	Não	Sim
Guyon et al. (2012)	Emissão de poluentes <sup>5</sup>	Plataforma logística para atender áreas urbanas	Não específica	R	Não	Não
Hammad e Akbarnezhad (2017)	Ruído	Aeropostos	N/A	Ae	Não	Não
Harris, Mumford e Naim (2014)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Redes logísticas (depósitos)	Fictício	-	Não	Sim
Jindal e Sangwan (2017)	Emissão de CO <sub>2</sub> (estimada pelo ACV)	Cadeia de suprimentos fechada	N/A	-	Não	Sim
Kizilboga et al. (2013)	Nenhum <sup>6</sup>	Centros de remanufatura (logística reversa)	Filtro de diesel para caminhão	R	Não	Sim
Lainez et al. (2008)	ACV ( <i>midpoint impact</i> )	Cadeia de suprimentos	Anidrido maleico	-	Não	Sim
Liqliang e Guoxin (2015)	Emissão de carbono	Cadeia de suprimentos do petróleo (refinarias)	petróleo e derivados	D, R, F	Não	Sim
Mohammadi, Torabi e T-Moghaddam (2014)	Consumo de energia <sup>7</sup> e ruído dos veículos	<i>Hubs</i>	N/A	R	Não	Não <sup>8</sup>
Mota et al. (2015a)	Impacto <i>midpoint</i> da ACV	Cadeia de suprimentos verde fechada	Componentes eletrônicos	R, Ae, Aq	Sim	Sim
Mota et al. (2015b)	Impactos <i>midpoint</i> da ACV	Cadeias de suprimentos verde fechada	N/A	R, Ae	Sim	Não

Table 3.3 Caracterização dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Critério ambiental</b>	<b>Tipo de facilidade</b>	<b>Produtos</b>	<b>Modos</b>	<b>Interm.?<sup>1</sup></b>	<b>C/S?</b>
Musavi e Bozorg-Amiri (2017)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Cadeia de suprimentos	Produtos perecíveis	R	Não	Sim
Niknamfar e Niaki (2016)	Emissão de CO <sub>2</sub> em função do consumo de combustível	Rede <i>hub-and-spoke</i>	Fictício	R <sup>9</sup>	Não <sup>10</sup>	Sim
Pati, Vrat e Kuamar (2008)	Reciclagem <sup>11</sup>	Sistema de logística reversa	Papel reciclado	-	Não	Sim
Santibañez-Aguilar et al. (2014)	Impactos da ACV	Cadeia de suprimentos de bi-orrefinarias	Etanol e derivados	R, D	Não	Não <sup>10</sup>
Sedehzadeh et al. (2016)	Consumo de energia	<i>Tree hub</i>	N/A	- <sup>12</sup>	- <sup>13</sup>	Sim
Shaw et al. (2016)	Emissão de carbono	Cadeia de suprimentos	N/A	-	Não	Sim
Smith et al. (2014)	Emissão de carbono	Cadeia de suprimentos verde	Vestuário	Ae, R, Aq	Não	Sim
Talaei et al. (2016)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Cadeia de suprimentos fechada	N/A	-	Não	Sim
Tang e Zhang (2015)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Facilidades	Fictício	R	Não	Sim
Tian e Liu (2015)	Consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub>	Estação de inspeção veicular	Veículos	R	Não	Sim
Varsei e Polyakovskiy (2017)	Emissão de CO <sub>2-eq</sub>	Cadeia de suprimentos	Garrafas de vinho	R, F, Aq	Sim	Sim
Wang et al. (2012)	Emissão de CO <sub>2</sub> e geração de resíduos	Cadeia de suprimentos fechada	Produtos de refrigeração	-	Não	Sim
Wang et al. (2013)	Emissão de CO <sub>2</sub> e geração de resíduos	Cadeia de suprimentos fechada	Produtos de refrigeração	-	Não	Sim
Wanke et al. (2015)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Rede logística (armazém)	- <sup>14</sup>	R, F	Não	Sim
Xifeng, Ji e Peng (2013)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Facilidades “sustentáveis”	Fictício	R	Não	Sim



Table 3.3 Caracterização dos modelos matemáticos sobre localização de facilidades verdes ou sustentáveis (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Critério ambiental</b>	<b>Tipo de facilidade</b>	<b>Produtos</b>	<b>Modos</b>	<b>Interm.?<sup>1</sup></b>	<b>C/S?</b>
You et al. (2012)	CO <sub>2-eq</sub>	Cadeia de suprimentos	Etanol derivado de lignocelulose	R, F	Sim	Sim
Yu e Solvang (2017)	Emissão de carbono	Cadeia de suprimentos reversa	Resíduo eletro-eletrônico	-	Não	Sim
Zhalechian et al. (2016)	Emissão de CO <sub>2</sub> , consumo de combustível e desperdício de energia <sup>15</sup>	Cadeia de suprimentos fechada <sup>(16)</sup>	Eletrônicos, TVs	R	Não	Sim
Zhang et al. (2015)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Parques logísticos	N/A	F, R, Aq	Sim	Sim
Zheng e Zhou (2012)	Emissão de CO <sub>2</sub>	Facilidades	N/A	-	Não	Não

Notas: N/A = Não se aplica; “-” = não especificado; (1) Interm. = intermodalidade; (2) Foco no lançamento de novos produtos; (3) Provavelmente rodoviário pelas características apresentadas no artigo; (4) Avaliada de maneira indireta, a partir da redução do número de caminhões usados para o transporte; (5) Não especificam quais poluentes; (6) Defendem que o uso de peças remanufaturadas pode reduzir o impacto ambiental; (7) Defendem que o menor consumo “minimizaria” a emissão de GEE, no arco e no *hub*; (8) Fazem simulação; (9) Afirmam ser aplicável para demais alternativas de transporte e intermodalidade; (10) Sugerem como estudos futuros; (11) Os impactos são tratados de maneira indireta, assumindo que a reciclagem causa menos danos ambientais e, portanto, deveria ser incentivada; (12) Classifica os diferentes tipos de veículos rodoviários como “modos”; (13) Afirmam que a rede é multimodal, mas o consumo de energia está voltado apenas para veículos rodoviários; (14) Não especifica, provavelmente granel pelas características da rede; (15) Nas filas de espera dos centros de remanufatura; (16) Fareeduddin et al. (2015) explicam que uma cadeia de suprimentos fechada é aquela em que as atividades diretas e reversas estão integradas. Garg et al. (2015) corroboram, afirmando que as cadeias fechadas requerem o processo de coleta de produtos no fim da vida ou no fim do uso, de maneira integrada às cadeias de suprimento tradicionais.

Em relação às características dos modelos matemáticos, observaram-se formulações com apenas um objetivo (em que se busca minimizar o custo total e a dimensão ambiental é quantificada em termos de custo, por exemplo), biobjetivo (na maioria das vezes, um econômico e um ambiental) ou multiobjetivo.

Embora a maioria dos modelos avaliados seja multicamada (76%), eles são dedicados a um único produto (58%), em um período de tempo específico (82%), não considerando a possibilidade de intermodalidade (87%). Além disso, opta-se pelo uso de variáveis determinísticas (76%) e, para lidar com a aleatoriedade dos dados, são feitos estudos de cenário e/ou sensibilidade (80%).

Em relação à análise de sensibilidade, há vários tipos de abordagens, como se pode analisar com maiores detalhes em: Abdallah et al. (2012), Afshari et al. (2014), Mohammadi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam (2014), Zhang et al. (2015), Fahimnia e Jabbarzadeh (2016), Das e Shaw (2017) e Jindal e Sangwan (2017).

Afshari et al. (2014), por exemplo, aloca diferentes pesos às funções objetivo do seu modelo biobjetivo (que visa minimizar o custo e maximizar a satisfação do consumidor), enquanto Fahimnia e Jabbarzadeh (2016) e Zhang et al. (2015) propõem diferentes cenários variando os parâmetros adotados em seus respectivos estudos de caso<sup>7</sup>. Mohammadi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam (2014) e Jindal e Sangwan (2017) lidam com a incerteza no processo de tomada de decisão por meio da aplicação da Lógica *Fuzzy*.

No que concerne especificamente à abordagem ambiental, Abdallah et al. (2012) adota diferentes custos de carbono nos três cenários estabelecidos para validação do seu modelo matemático. De maneira similar, Das e Shaw (2017) propõem cinco cenários: um lida com a política *carbon cap*, o outro varia o índice social e os três demais avaliam eventuais mudanças nos parâmetros probabilísticos do modelo.

Enfatiza-se que a análise de sensibilidade é relevante na presente tese, uma vez que permite avaliar as modificações resultantes da alternância da importância dada aos objetivos econômico e ambiental (ou do estabelecimento de diferentes políticas públicas voltadas para regulação das emissões de carbono) durante o processo de planejamento.

Quanto aos objetivos de otimização, a minimização do custo, a maximização do lucro ou do valor presente líquido - VPL foram os objetivos mais frequentes associados à dimensão econômica (com 33, 6 e 4 ocorrências, respectivamente). Já na dimensão ambiental, os objetivos mais recorrentes foram a minimização da emissão de carbono (custo e/ou crédito, envolvendo CO, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2-eq</sub>), dos impactos avaliados por meio da ACV e da geração de resíduos, com 28, 6 e 4 ocorrências, respectiva-

---

<sup>7</sup>Fahimnia e Jabbarzadeh (2016) propõem 27 cenários para avaliar o impacto da interrupção dos fornecedores na sustentabilidade da cadeia. Já os cenários de Zhang et al. (2015) variam de acordo com o comportamento da demanda logística.

mente. Os principais objetivos estão sintetizados na Tabela 3.4. Evidencia-se que, quando a dimensão social é avaliada, adota-se de maneira recorrente o indicador “número de empregos gerados”.

Tabela 3.4: Objetivos dos modelos matemáticos selecionados

<b>Objetivo a ser otimizado</b>	<b>Frequência</b>	<b>Dimensão</b>
Custo	33	Econômica
CO, CO <sub>2</sub> , CO <sub>2-eq</sub> (emissão, custo ou crédito de carbono)	28	Ambiental
Impactos ambientais (e.g. ACV)	6	Ambiental
Lucro	6	Econômica
Empregos gerados	6	Social
Resíduos	4	Ambiental
VPL	4	Econômica
Nível de serviço	3	Econômica
Satisfação do consumidor	2	Econômica
Consumo de energia	2	Ambiental
Ruído	2	Ambiental
Outros	10	

Em relação especificamente aos fatores ambientais considerados nos trabalhos, têm-se: emissões (CO, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2-eq</sub>, GEE e poluentes), crédito de carbono, políticas de emissão (*carbon tax*, *carbon cap*, *carbon cap-and-trade*), pegada de carbono, categorias e indicadores da ACV, consumo de combustível, consumo e recuperação de energia, ruído, geração de resíduos, reciclagem e recuperação de materiais e o uso de materiais reciclados. Além disso, um dos artigos (Fahimnia e Jabbarzadeh, 2016) atribui notas à dimensão ambiental, a partir da opinião de especialistas.

Contudo, o critério mais recorrente nos modelos matemáticos é a emissão de carbono (e suas variações - como pegada de carbono, emissão de CO<sub>2</sub> etc.). Também são consideradas as políticas que regulamentam esta emissão, especialmente o *carbon cap* e o *carbon trade*. Ainda, alguns modelos fazem a aplicação da ACV para avaliação de impactos ambientais, especialmente, quando o enfoque do estudo são cadeias de suprimentos.

Ressalta-se que não há consenso sobre como tratar tais aspectos ambientais nas formulações matemáticas, como evidenciado na Tabela 3.5. Verifica-se que a maioria dos artigos inclui parâmetros e/ou variáveis ambientais na função objetivo, seja por meio da composição de uma única função de custo (7 *papers*); ou pela proposição de outra(s) função(ões) que vise(m) mensurar o impacto ambiental (21 artigos). Das e Shaw (2017), Zhang et al. (2015) e Tian e Liu (2015) são os únicos autores que lidam com a dimensão ambiental a partir da proposição apenas de restrições a serem

incluídas no modelo principal. Os demais trabalhos abordam esta dimensão, tanto nas restrições quanto na função objetivo.

Tabela 3.5: Tratamento do aspecto ambiental nos modelos matemáticos

<b>Forma de mensuração</b>	<b>Artigos</b>
Função objetivo exclusivamente ambiental	Accorsi et al. (2015); Erkut et al. (2008); Fahimnia e Jabbarzadeh (2016); Hammad e Akbarnezhad (2017); Harris, Mumford e Naim (2014); Mohammadi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam (2014); Mota et al. (2015a); Mota et al. (2015b); Musavi e Bozorgi-Amiri (2017); Santibanez-Aguilar et al. (2014); Santibañez-Aguilar et al. (2014); Sedehzadeh et al. (2016); Smith et al. (2014); Talaei et al. (2016); Tang e Zhang (2015); Varsei e Polyakovskiy (2017); Wang et al. (2012); Wang et al. (2013); Xifeng, Ji e Peng (2013); You et al. (2012); Zhalechian et al. (2016)
Única função objetivo que envolve custos ambientais e de outra natureza	Diabat et al. (2013); Elhedhli e Merrick (2012); Guyon et al. (2012); Liqiang e Guoxin (2015); Shaw et al. (2016); Wanke et al. (2015); Zheng e Zhou (2012)
Restrição ambiental	Das e Shaw (2017); Tian e Liu (2015); Zhang et al. (2015)
Ambos (função objetivo e restrição)	Abdallah et al. (2012); Anvari e Turkay (2017); Bojarski et al. (2009); Brandenburg (2015); Costa, Duarte e Sarache (2017); Fareeduddin et al. (2015); Ghaddar e Naoum-Sawaya (2012); Lainez et al. (2008); Niknamfar e Naiki (2016); Yu e Solvang (2017)

Notas: Afshari et al. (2014), Garg (2015), Kizilboga et al. (2013), Pati, Vrat e Kuamar (2008) não estão nesta tabela, uma vez que eles avaliam o impacto ambiental de maneira indireta (como será discutido na Seção 3.2.1). Por serem artigos de revisão de literatura, Chen, Olhager e Tamg (2014) e Eskandarpour et al. (2015) também não constam na tabela.

Em relação às facilidades a serem localizadas, varia-se quanto ao grau de complexidade e níveis de camadas, de simples estações para inspeção veicular a cadeias de suprimentos fechadas. No entanto, a maioria dos trabalhos se dedica ao *design* de cadeias de suprimentos fechadas visando identificar a localização ótima de facilidades de manufatura/remanufatura e/ou centros de distribuição (conforme evidenciado na Tabela 3.6).

De maneira geral, as análises são conduzidas a partir do ponto de vista empresarial, buscando configurações que reduzam o custo ou aumentem a lucratividade da cadeia. Assim, pode-se afirmar que, além de haver poucos estudos sobre o tema (2% em relação à base de dados completa), ainda há lacunas a serem preenchidas, especialmente no que concerne a modelagens para o planejamento estratégico governamental.

Por fim, como características gerais dos modelos analisados, nota-se que a maioria das análises estão voltadas para os EUA, Europa ou países asiáticos (além dos

estudos fictícios/numéricos, apenas para validação dos modelos). Além disso, a decisão principal está relacionada à localização das facilidades e/ou alocação dos fluxos de materiais; sendo que dificilmente se considera a intermodalidade.

Tabela 3.6: Tipos de facilidades investigadas nos trabalhos analisados

<b>Autor</b>	<b>CS<sup>(a)</sup></b>	<b>CSF<sup>(b)</sup></b>	<b>Armazém<sup>(c)</sup></b>	<b>PL<sup>(d)</sup></b>	<b>Hubs</b>	<b>Outras</b>
Abdallah et al. (2012)	x					
Accorsi et al. (2015)		x				
Afshari et al. (2014)			x <sup>1</sup>			
Anvari e Turkay (2017)						x
Bojarski et al. (2009)	x					
Brandenburg (2015)	x					
Costa, Duarte e Sarache (2017)	x					
Das e Shaw (2017)	x					
Diabat et al. (2013)		x				
Elhedhli e Merrick (2012)	x					
Erkut et al. (2008)						x <sup>2</sup>
Fahiminia e Jabbarzede (2016)	x <sup>3</sup>					
Fareeduddin et al. (2015)		x				
Garg et al. (2015)		x				
Ghaddar e Naoum-Sawaya (2012)						x <sup>8</sup>
Guyon et al. (2012)				x <sup>4</sup>		
Hammad e Akbarnezhad (2017)						x <sup>8</sup>
Harris, Mumford e Naim (2014)			x			
Jindal e Sangwan (2017)		x				
Kizilboga et al. (2013)						x <sup>8</sup>
Lainez et al. (2008)	x					
Liqiang e Guoxin (2015)	x					
Mohammadi, Torabi e T-Moghaddam (2014)					x	
Mota et al. (2015a)		x				
Mota et al. (2015b)		x				
Musavi e Bozorgi-Amiri (2017)	x					
Niknamfar e Niaki (2016)					x <sup>5</sup>	
Pati, Vrat e Kuamar (2008)						x <sup>8</sup>
Santibañez-Aguilar et al. (2014)	x					
Sedehzadeh et al. (2016)					x <sup>6</sup>	
Shaw et al. (2016)	x					
Smith et al. (2014)	x					
Talaei et al. (2016)		x				
Tang e Zhang (2015)						x
Tian e Liu (2015)						x <sup>8</sup>
Varsei e Polyakovskiy (2017)	x					
Wang et al. (2012)		x				

Tabela 3.6: Tipos de facilidades investigadas nos trabalhos analisados

<b>Autor</b>	<b>CS<sup>(a)</sup></b>	<b>CSF<sup>(b)</sup></b>	<b>Armazém<sup>(c)</sup></b>	<b>PL<sup>(d)</sup></b>	<b>Hubs</b>	<b>Outras</b>
Wang et al. (2013)		x				
Wanke et al. (2015)			x			
Xifeng, Ji e Peng (2013)						x
You et al. (2012)	x					
Yu e Solvang (2017)						x <sup>8</sup>
Zhalechian et al. (2016)		x				
Zhang et al. (2015)				x <sup>7</sup>		
Zheng e Zhou (2012)						x
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>11</b>

Notas: (a) CS = cadeia de Suprimentos; (b) CSF = cadeia de suprimentos fechada; (c) Depósitos; (d) Facilidades, em geral; (1) Depósitos centrais e regionais; (2) Facilidades dedicadas ao gerenciamento de resíduos; (3) Focado nos fornecedores; (4) Entrega de mercadorias em áreas urbanas; (5) Rede *Hub-and-spoke*; (6) *Tree hub*; (7) Parques logísticos; (8) Respectivamente: fábricas, aeroportos, centros de remanufatura, sistemas de logística reversa, estações de inspeção veicular; cadeia de suprimentos reversa.

Ressalta-se que não foi encontrado, dentre os trabalhos analisados, nenhum modelo com proposta semelhante ao desenvolvido nesta tese: que dê suporte ao planejamento estratégico governamental no que diz respeito à localização ótima de facilidades que permitam a integração modal, visando a redução dos custos logísticos e, ao mesmo tempo, considerando a emissão de CO<sub>2</sub> no processo de tomada de decisão. Para trabalhos que considerem apenas a dimensão econômica em modelos de localização-alocação com viés de planejamento governamental, sugere-se a leitura de: Dubke (2006), Costa (2014) e Guimarães (2015).

Uma vez mapeada a literatura sobre localização de facilidades e meio ambiente, na Seção 3.2 categorizaram-se os artigos da Tabelas 3.2 e 3.3 de acordo com a abordagem ambiental adotada nos estudos.

## 3.2 Abordagens do aspecto ambiental nas modelagens matemáticas sobre localização de facilidades

Esta seção discorre sobre como os artigos selecionados neste capítulo lidam com a dimensão ambiental nas formulações matemáticas. Apresentam-se, na seguinte ordem: (i) abordagens indiretas (Seção 3.2.1); (ii) adoção da ACV (Seção 3.2.2); (iii) abordagem sustentável (Seção 3.2.3); e, (iv) emissão de carbono e políticas

regulatórias (Seção 3.2.4).

### 3.2.1 Abordagem indireta do aspecto ambiental

Dentre os *papers* investigados e categorizados nas Tabelas 3.2 e 3.3, verificou-se que alguns lidam com o aspecto ambiental de maneira indireta. Isso significa que não há nenhum parâmetro ou variável ambiental nos modelos matemáticos desenvolvidos (Pati, Vrat e Kumar, 2008; Kizilboga et al., 2013; Afshari et al., 2014; Garg et al., 2015).

Por exemplo, Afshari et al. (2014) consideram que a coleta, o reuso e o descarte apropriado de materiais são ações *eco-friendly*. Assim, partem do pressuposto que, ao determinar o número de itens destinados à reciclagem, seu modelo também pode ser considerado *eco-friendly*. No entanto, esta assunção precisaria ser avaliada, visto que as atividades envolvendo o processo de reciclagem (incluindo, aqui, o transporte de coleta) podem causar impactos ambientais.

Garg et al. (2015) também assumem que reciclar é uma ação ecologicamente correta e que, portanto, deveria ser incentivada. Os autores estudam o fluxo reverso em uma cadeia de suprimentos fechada, considerando que os usuários têm incentivos financeiros para retornar o produto ao ciclo, no final da sua vida útil. Dessa forma, o produto poderia ser destinado ao reuso, reciclagem ou disposição final. No que concerne à emissão de carbono, considera-se que reduzir o número de caminhões usados no transporte de distribuição poderia mitigar o impacto ambiental. No entanto, além do resultado desta ação não ser mensurado, ele não inclui o transporte reverso, fundamental no caso investigado.

Com uma abordagem similar, Kizilboga et al. (2013) associam o uso de produtos remanufaturados à redução de impactos ambientais, mas isso não é tratado diretamente no modelo matemático desenvolvido. Os autores apresentam uma adaptação do problema de localização capacitado para determinação da localização ótima de centros de remanufatura numa cadeia de logística reversa. Embora assumam que o uso de produtos remanufaturados poderia reduzir algum tipo de impacto ambiental (especialmente a depleção de recursos naturais), a proposta dos autores não incorpora esta dimensão na formulação matemática. Ainda, os próprios autores alertam que o processo de remanufatura investigado - de filtro de diesel particulado - consome energia e emite GEEs, podendo ser uma alternativa não tão vantajosa como se supõe.

De maneira análoga, Pati, Vrat e Kumar (2008) assumem que a reciclagem consome menos energia que o processo tradicional de produção de papel (atividade-alvo do seu estudo de caso), portanto, isso reduziria o consumo de recursos naturais e a poluição. Contudo, a redução de tais impactos ambientais não é avaliada no artigo:

o modelo matemático visa maximizar a quantidade de papel coletada e destinada à reciclagem.

Entende-se que, talvez, as abordagens desenvolvidas nos trabalhos mencionados nos parágrafos anteriores não sejam as mais apropriadas, tendo em vista que os impactos ambientais não são, de fato, mensurados; tampouco, os resultados das ações propostas (e.g. reciclagem, reuso). Não obstante, os artigos sugerem o interesse da literatura internacional por este tipo de tema (meio ambiente e *design* da cadeia de suprimentos, incluída aqui a localização de facilidades).

### 3.2.2 Adoção da ACV

A ACV estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto, abrangendo desde a aquisição da matéria-prima até sua disposição final. As categorias gerais de impactos ambientais consideradas na análise incluem o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas (ABNT, 2014).

De acordo com Eskandarpour et al. (2015), a ACV é uma das técnicas usualmente aplicadas para avaliar o impacto ambiental durante o processo de tomada de decisão. No entanto, na revisão de literatura desenvolvida na Seção 3.1, foram encontrados poucos artigos que aplicam esta técnica associada aos modelos de otimização voltados para localização de facilidades.

Isso pode ser justificado pela dificuldade em obter dados relacionados aos impactos ambientais e em aplicar a técnica para avaliar toda a cadeia de suprimentos. Assim, torna-se menos complexo lidar com um número definido de objetivos, restrições ou parâmetros ligados ao aspecto ambiental do que avaliar a cadeia de suprimentos, como um todo (Eskandarpour et al., 2015). A escassez de dados se soma à dificuldade em propor modelos genéricos, uma vez que os parâmetros da ACV são determinados para refletir, especificamente, a operação do sistema em avaliação. A ABNT NBR ISO 14.040:2009 determina, por exemplo, que a fronteira do sistema e a unidade funcional - dois elementos obrigatórios nos estudos sobre ACV - precisam estar aderentes ao sistema em estudo (ABNT, 2014).<sup>8</sup>

Alguns artigos da Tabela 3.3 visam avaliar o impacto de toda cadeia de suprimentos, então, eles adotam a técnica ACV, que permite avaliar diferentes tipos de impactos (*mid* e *endpoints*<sup>9</sup>) a partir de diferentes fronteiras do sistema (como

---

<sup>8</sup>A unidade funcional diz respeito ao “desempenho quantificado de um sistema de produto para uso como uma unidade de referência”(ABNT, 2014, p.4). Em outras palavras, ela estabelece uma referência para comparação das entradas e saídas do sistema em avaliação. A fronteira do sistema, por sua vez, representa “conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto”(ABNT, 2014, p.5), ou seja, delimitam quais atividades de um dado processo serão analisadas durante a ACV.

<sup>9</sup>De acordo com Mendes, Bueno e Ometto (2016), os impactos *midpoint* são oriundos de processos físicos, químicos e/ou biológicos intermediários - e.g. ecotoxicidade humana, radiação ionizante, efeitos respiratórios e depleção do ozônio, mas que têm relação direta com as categorias finais *end-*



*cradle-to-grave*, *cradle-to-gate*, *gate-to-gate* e suas variantes - e.g. *well-to-wheel* que é específica para análise em transporte - Balaman, 2019). Dentre os *papers* levantados, apenas Bojarski et al. (2009), Abdallah et al. (2012), You et al. (2012), Santibanez-Aguilar et al. (2014), Mota et al. (2015a e 2015b) e Jindal e Sangwan (2017) aplicam a ACV.

Os *softwares* e as bases de dados mais usadas são SimaPro, Gabi e EcoInvent. Bojarski et al. (2009), por exemplo, usam o *software* Gabi (com a metodologia Impact 2000+) para avaliar o impacto ambiental da cadeia de suprimentos de anidrido maleico, considerando quatorze impactos intermediários - *midpoint* (como toxicidade humana, radiação ionizante, depleção da camada de ozônio, ocupação do solo, aquecimento global, energia não renovável, extração mineral) e quatro finais - *endpoint* (qualidade do ecossistema, saúde humana, depleção dos recursos naturais e potencial de aquecimento global).

Em uma abordagem diferente, Abdallah et al. (2012) usam o Indicator 99 do *software* SimaPro para avaliar os impactos ambientais (relacionados às categorias: saúde humana, qualidade do ecossistema e dos recursos) no *design* de cadeias de suprimentos sensíveis ao carbono. A ACV é realizada para comparar cada cenário em que as emissões de carbono assumem diferentes custos. Também usando o SimaPro, Mota et al. (2015a e 2015b) aplicam a metodologia ReCiPe para determinar o *design* de cadeias de suprimentos verdes. Diretrizes e orientações específicas sobre a aplicação da ACV não serão abordadas neste capítulo por estarem fora do escopo da presente tese, podendo ser encontradas na normatização ABNT NBR 14.040:2014 (ABNT, 2014).

Por fim, faz-se necessário enfatizar que os modelos de otimização que adotam ACV para medir os impactos ambientais usualmente têm aplicações restritas ao contexto em análise (Eskandarpour et al., 2015). Assim, dificilmente são aplicáveis a outras realidades, visto os resultados da ACV são altamente dependentes da fronteira do sistema e da unidade funcional escolhidas (como determinado pela ISO 14.040:2016 e já mencionado nesta seção).

### 3.2.3 Abordagem sustentável

Entre os trabalhos da Tabela 3.3, foram identificados sete artigos que desenvolvem uma análise sustentável, de acordo com as diretrizes das Nações Unidas (United Nation, 2015). Em outras palavras, eles adotam parâmetros sociais, ambientais e econômicos nos modelos matemáticos propostos que influenciam, diretamente, a determinação da localização ótima das facilidades. A seguir são apresentadas apenas as

---

*points*. Já os *endpoint* consideram todo o ciclo, envolvendo um dano específico em uma macroárea que pode ser a saúde humana, o ambiente natural ou os recursos naturais. Assim, a depleção da camada de ozônio é um impacto *midpoint*, enquanto a mudança climática é *endpoint*.

discussões sobre as dimensões sociais e ambientais, já que os parâmetros econômicos abordados são os tradicionais (já mencionados na Tabela 3.2).

Além de lidar com os impactos econômicos tradicionais (especificamente, os custos da cadeia de suprimentos), Fahimnia e Jabbarzadeh (2016) atribuem notas às dimensões econômica e social dos fornecedores da cadeia de suprimentos com base na opinião de especialistas. No que diz respeito ao aspecto ambiental, aqueles considerados mais relevantes são o uso de fontes alternativas de energia, o consumo de água e a emissão de GEEs.

Nota-se que estes aspectos são diferentes daqueles indicados como os mais recorrentes na Tabela 3.4 em função das características do estudo de caso: o processo de transformação da fibra sintética é energo-intensiva e requer uma grande quantidade de água.<sup>10</sup> Zhalechian et al. (2016), por sua vez, propõem um modelo para suporte ao planejamento operacional e estratégico da cadeia de suprimentos, em que o aspecto social é medido em função do número de empregos criados e o desenvolvimento econômico balanceado, enquanto o aspecto ambiental está associado à emissão de CO<sub>2</sub> e ao consumo de energia.

Santibanez-Aguilar et al. (2014) e You et al. (2012) estudam a cadeia de suprimentos de combustíveis, sendo que o primeiro foca em biorrefinarias e o segundo se dedica ao planejamento da cadeia de etanol a base de lignocelulose. Em ambos, o impacto ambiental é avaliado a partir da aplicação do ACV (sendo que You et al. (2012) avaliam, especificamente, a emissão de CO<sub>2-eq</sub>). Já o aspecto social está relacionado ao número de empregos criados (assim como em Zhalechian et al., 2016).

No modelo proposto por Anvari e Turkay (2017), o aspecto ambiental é tratado de duas maneiras: (i) há uma função objetivo que busca minimizar a emissão de CO<sub>2</sub> e a geração de resíduos; e, (ii) é proposta uma restrição que limita o consumo de água e de terra (área ocupada). Já o aspecto social está relacionado ao que os autores chamam de “utilidade social”, a qual é mensurada por meio de uma função objetivo específica que agrega os valores atribuídos à equidade na distribuição de empregos e no desenvolvimento, ao nível de segurança e ao grau de acesso médico.

Varsei e Polyakovskiy (2017) e Das e Shaw (2017) aplicam técnicas multicritério para avaliar o impacto social. Com enfoque na cadeia de suprimentos de vinho, Varsei e Polyakovskiy (2017) propõem uma função objetivo que visa minimizar a emissão de CO<sub>2-eq</sub> das atividades de transporte em todos os elos da cadeia de suprimentos. Há também uma função objetivo associada ao impacto social atribuído aos fornecedores e às facilidades. Este impacto é medido genericamente a partir de uma nota, a qual os autores afirmam estar associada ao nível de emprego e ao impacto regional, contudo, o cálculo não é detalhado no artigo. No estudo de caso, a determinação das notas atribuídas à dimensão social é feita com base em uma

---

<sup>10</sup>Este modelo está detalhado na Seção B.4 no Apêndice B.

adaptação da técnica AHP.

Em Das e Shaw (2017), os aspectos ambiental (emissão de carbono) e social (índice de desempenho social dos fornecedores) são tratados em restrições específicas. O diferencial desta proposta reside em como o impacto social é determinado: os autores transformam fatores qualitativos em um índice social, por meio da aplicação combinada das técnicas multicritérios *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* - TOPSIS e da AHP. As emissões, por sua vez, envolvem tanto a aquisição de matéria-prima, quanto a produção, o transporte e a movimentação.

Ressalta-se que alguns artigos afirmam desenvolver propostas sustentáveis, porém as formulações matemáticas apresentadas não incorporam as três dimensões - econômica, social e ambiental - que compõem o conceito de sustentabilidade. Isto está relacionado à confusão conceitual que ainda ocorre nas áreas científicas, baseada na crença de que ao incorporar o aspecto ambiental, o processo se torna sustentável. Isto pode ser observado nos trabalhos de Zhang et al (2015) e Mohammadi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam (2014), que clamam por modelos sustentáveis, mas não incluem nenhum parâmetro ou variável relacionado ao aspecto social.

Não obstante, salienta-se que algumas pesquisas têm sido desenvolvidas chamando atenção para a necessidade das avaliações intituladas “sustentáveis” estarem adequadas à proposta de United Nations (2015). Discussões sobre as dimensões que compõe o conceito de sustentabilidade em transporte podem ser encontradas em: Litman e Burwell (2006), Litman (2015), Figueroa e Ribeiro (2013), Santos e Ribeiro (2013) e Guimarães, Leal Junior e Silva (2018). Por fim, pontua-se que Litman (2015) já estende o conceito de sustentabilidade para outros aspectos, incluindo a governança, por exemplo. No entanto, este tema não será detalhado no presente capítulo por estar além do escopo desta pesquisa.

### **3.2.4 Emissão de carbono e políticas regulatórias**

Verificou-se na Seção 3.1 que a emissão de carbono é um dos principais impactos ambientais abordados pelos artigos da Tabela 3.2. Além disso, evidenciou-se neste capítulo que a recorrência e relevância da emissão de carbono nos *papers* pode ser justificada pelo fato de acordos internacionais (e.g. Protocolo de Kyoto e Acordo de Paris) estabelecerem metas de mitigação das emissões.<sup>11</sup>

Assim, a Tabela 3.7 apresenta como os *papers* analisados lidam com a emissão de carbono em seus modelos matemáticos, destacando se ela é taxada ou avaliada em termo de quantidade emitida, quais as fontes de emissão consideradas e se alguma política de regulação de carbono é abordada.

---

<sup>11</sup>O Acordo de Paris define, em seu Artigo 6, quais ações deveriam ser implementadas para mitigar as emissões de GEEs (CO<sub>2</sub> incluso). Ressalta-se que esta meta é obrigatória apenas para os países signatários que somam mais de 55% das emissões globais (MMA, 2019).

Tabela 3.7: Tratamento dado ao CO<sub>2</sub> nos artigos levantados

Autor	Mensuração		Modelo		Fontes de emissão			Políticas de carbono				
	Emissão	Custo	Função Objetivo	Restrições	Fornecedor	Operação <sup>(1)</sup>	Transporte	Facilidade	Carbon cap	Carbon tax	Carbon trade	Nenhum
Abdallah et al. (2012)	x	x	x	x	x	x	x	Operação	x		x	
Accorsi et al. (2015)	x		x		x	x	x	Abertura, Operação				x
Anvari e Turkay (2017)	x		x			x						x
Bojarski et al. (2009)	x	x	x <sup>(2)</sup>	x <sup>(2)</sup>	x	x	x	N/A <sup>(3)</sup>	x		x	
Brandenburg (2015)	x		x	x		x		Operação				x
Costa, Duarte e Sarache (2017)	x	x	x		x	x	x					x
Das e Shaw (2017)	x			x	x	x	x	Operação	x			
Diabat et al. (2013)		x	x		x	x	x	Operação				x
Elhedhli e Merrick (2012)		x	x			x			x <sup>(4)</sup>		x <sup>(4)</sup>	
Erkut et al. (2008)	x <sup>(5)</sup>		x					Operação				x
Fareeduddin et al. (2015)	x	x	x	x		x	x	Operação	x	x	x	
Ghaddar e Naoum-Sawaya (2012)	x	x	x	x		x	x		x		x	

Tabela 3.7: Tratamento dado ao CO<sub>2</sub> nos artigos levantados

Autor	Mensuração		Modelo		Fontes de emissão			Políticas de carbono				
	Emissão	Custo	Função Objetivo	Restrições	Fornecedor	Operação <sup>(1)</sup>	Transporte	Facilidade	Carbon cap	Carbon tax	Carbon trade	Nenhum
Guyon et al. (2012)		x	x				x	Operação				x <sup>(6)</sup>
Harris, Mumford e Naim (2014)	x		x				x	Operação				x
Jindal e Sangwan (2017)	x		x				x					x
Liqiang e Guoxin (2015)		x	x			x	x			x		
Musavi e Bozorgi-Amiri (2017)	x		x				x					x
Niknamfar e Niaki (2016)		x	x <sup>(7)</sup>	x <sup>(7)</sup>			x <sup>(7)</sup>					x <sup>(6)</sup>
Shaw et al. (2016)		x	x			x	x	Abertura, Operação	x		x	
Smith et al. (2014)	x		x			x	x					x
Talaei et al. (2016)	x		x			x	x	Abertura, Operação				x
Tang e Zhang (2015)	x		x				x					x
Varsei e Polyakovskiy (2017)	x		x				x					x

Tabela 3.7: Tratamento dado ao CO<sub>2</sub> nos artigos levantados

Autor	Mensuração		Modelo		Fontes de emissão			Políticas de carbono				
	Emissão	Custo	Função Objetivo	Restrições	Fornecedor	Operação <sup>(1)</sup>	Transporte	Facilidade	Carbon cap	Carbon tax	Carbon trade	Nenhum
Wang et al. (2012)	x		x			x	x					x
Wang et al. (2013)	x		x			x	x					x
Wanke et al. (2015)		x	x				x					x
Xifeng, Ji e Peng (2013)	x		x				x					x
You et al. (2012)	x		x		x	x	x	Operação				x
Yu e Solvang (2017) <sup>(2)</sup>	x	x	x	x		x <sup>(8)</sup>	x <sup>(8)</sup>	Abertura, Operação	x		x	
Zhang et al. (2015)	x			x			x					x <sup>(6)</sup>
Zhalechian et al. (2016)	x		x				x					x
Zheng e Zhou (2012)		x	x				x					x <sup>(6)</sup>

Notas: Emissão = diz respeito à quantidade emitida, seja em gramas, quilos ou tonelada. (1) Considera os fluxos diretos e reversos, e.g. fabricação ou reciclagem; (2) Está considerado de maneira indireta na função objetivo, uma vez que as emissões são um dos principais impactos avaliados pela ACV (e.g. Mudança Climática); (3) N/A = não aplicável, visto que os autores avaliam as emissões diretas e o "dano" na cadeia de suprimentos, mas não especificam se a facilidade está envolvida; (4) Os autores defendem que o modelo seria útil em regiões sob influência das políticas de restrição de emissões, porém isto não é considerado de maneira explícita; (5) Não apenas carbono, mas GE/Es; (6) Embora os artigos não mencionem qualquer política de carbono, pode-se considerar uma aplicação do *carbon tax*, uma vez que se cobra pela emissão de carbono; (7) É considerado de maneira indireta nas restrições, por meio da regulação da velocidade do veículo; (8) Consideram a emissão do sistema de logística reversa, especificamente, relacionada ao tamanho da facilidade, ao tipo de tecnologia adotada e ao transporte.

Verifica-se, na Tabela 3.7 que a maioria dos trabalhos lida com a emissão de CO<sub>2</sub> em termos de quantidade emitida - usualmente, em toneladas (em 29 artigos), embora 13 *papers* a mensurem em termos de custo (unidade monetária/unidade de peso, e.g. R\$/t). Ainda, cinco artigos consideram tanto a quantidade de carbono emitida quanto o valor financeiro associado às emissões.

No que diz respeito à formulação matemática, a maior parte dos trabalhos inserem o carbono - como custo ou emissão - na função objetivo: seja como parte de uma função objetivo econômica (modelo mono-objetivo), seja por meio da proposição de uma função objetivo ambiental (bi ou multiobjetivo).

Quanto às fontes, os artigos lidam, principalmente, com as emissões oriundas do transporte (29 registros). Não obstante, uma vez que uma grande quantidade de *papers* está focada na cadeia de suprimentos (fechada ou não), as emissões da operação (direta - como manufatura - ou reversa - como reciclagem) também são contabilizadas (em 15 artigos). Foram identificados, ainda, 13 artigos que consideram as emissões das facilidades, durante sua construção e abertura e/ou operação.

Salienta-se que a maior parte dos trabalhos não aborda explicitamente as políticas de regulação de carbono, ainda que alguns deles (como Guyon et al., 2012; Zhang et al., 2015; Niknamfar e Naiki, 2016) lidem com *carbon tax* em sua análise, a partir da proposição de modelos em que as emissões de carbono são taxadas. As políticas mais consideradas na formulação dos modelos matemáticos analisados são: *carbon trade* (em 9 artigos), seguido por *carbon cap* (em 8 *papers*).

A escassez de modelos envolvendo políticas de regulação pode ser explicada pela Figura 2.6 - que indica o interesse recente da comunidade científica pelo tema. Somado a isso, sabe-se que os acordos internacionais visando a mitigação das emissões tiveram maior ênfase a partir da década de 90. O Acordo de Paris, por exemplo, foi lançado em 2015 (na 21<sup>a</sup> Conferência das Partes - COP21 da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - UNFCCC) e ratificado pelas partes envolvidas apenas em 2017 (Ministério de Meio Ambiente, 2015).

Salienta-se que o Acordo de Paris, em seu Artigo 6, estabelece as bases para a operação dos mercados internacionais de carbono, reforçando as metas, a transparência e a prestação de contas (*accountability*). Isto sugere que o estabelecimento e a operacionalização de um mercado que viabilize o comércio de carbono (ou da política *cap-and-trade*) poderia auxiliar as partes envolvidas no Acordo de Paris a alcançarem as metas de redução de emissão (United Nations, 2019). Recomenda-se a leitura de *United Nations* (2019) para maiores detalhamentos sobre o tema citado.

Uma vez enfatizada a relevância do comércio de carbono no contexto internacional, convém destacar os trabalhos da Tabela 3.7 que explicitamente consideram esta política em suas propostas: Bojarski et al. (2009); Fareeduddin et al. (2015); Abdallah et al. (2012); Ghaddar e Naoum-Sawaya (2012); Diabat et al. (2013); e,

Yu e Solvang (2017). Destaca-se o trabalho de Fareeduddin et al. (2015) que propõe quatro modelos de otimização: um baseado exclusivamente no custo logístico e os outros lidando com políticas de regulação da emissão de carbono - *carbon tax*, *carbon cap* e *carbon cap-and-trade* - para determinar o *design* de cadeias de suprimentos fechadas.

Por fim, ressalta-se que foram selecionados sete trabalhos apresentados neste capítulo (com base na diversidade das abordagens), cujas modelagens foram detalhadas no Apêndice B. Dois *papers* lidam com o impacto ambiental de maneira indireta (Afshari et al., 2014; Garg et al., 2015); dois aplicam ACV para avaliá-lo (Bojarski et al., 2009; Santibañez-Aguilar et al., 2014); e, dois lidam especificamente com a emissão de carbono (Brandenburg, 2015 e Fareeduddin et al. 2015). Ainda, dentre estes, dois fazem uma avaliação sustentável (Fahimnia e Jabbarzadeh, 2016 e Santibañez-Aguilar et al., 2014).

Uma vez conhecidas as diferentes abordagens disponíveis na literatura sobre localização de facilidades e meio ambiente, o Capítulo 4 se dedica ao desenvolvimento do objetivo principal deste trabalho. Vale enfatizar que a discussão feita no presente capítulo ratificou a existência de um *gap*, tendo em vista que não foram encontrados trabalhos cujo viés fosse eminentemente governamental, considerando os aspectos econômico e ambiental simultaneamente. Dessa forma, acredita-se que o modelo matemático proposto nesta tese poderá contribuir em estudos futuros sobre o tema.



## Capítulo 4

# Modelagem matemática para localização-alocação de CILs considerando critérios econômicos e ambientais

O Capítulo 3 permitiu compreender como a dimensão ambiental tem sido abordada nos modelos de otimização voltados para a localização de facilidades. Assim, auxiliou na definição de alguns pressupostos e na justificativa de algumas escolhas que nortearam a elaboração do modelo matemático proposto neste capítulo. Por exemplo, a opção por lidar com a emissão de  $\text{CO}_2$  (em vez de outra influência ambiental) decorre da identificação de que este impacto é o mais recorrente nos estudos sobre o tema, além de ser alvo de acordo e tratados internacionais visando a proteção do meio ambiente (e.g. Acordo de Paris) .

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho se baseia na formulação de Guimarães (2015), que fora aplicado por Guimarães et al. (2017a e 2017b). Trata-se de um modelo voltado para o planejamento estratégico governamental em que se deseja determinar a localização ótima de CILs de maneira a minimizar os custos logísticos totais.

Tradicionalmente, as formulações estabelecem que as demandas precisam ser atendidas, não importando, contudo, qual (ou quais) origem(ns) atenderá(ão) esta exigência. O diferencial do modelo de Guimarães (2015) em relação aos desenvolvidos anteriormente no contexto brasileiro (e.g. Dubke, 2006; Costa, 2014) reside no fato de considerar, explicitamente, o atendimento às demandas par-a-par.

Por demanda par-a-par, entende-se que: se uma zona de consumo demanda certo produto de uma zona de produção específica, esta relação comercial será respeitada. Em outras palavras, a demanda não poderá ser atendida por outra zona de produção,

ainda que os produtos sejam homogêneos e isso proporcione redução dos custos totais.

De acordo com Guimarães (2015), isso representa a realidade de maneira mais fidedigna, pois considera que: (1) fornecedores de bens e serviços preocupam-se em atender clientes específicos e/ou respeitar contratos já estabelecidos; e (2) pode haver relação de confiança entre produtores e consumidores, não estando os clientes dispostos a ter sua demanda satisfeita por outros fornecedores. Além disso, dependendo do tipo de produto, a qualidade pode variar de acordo com a região (como a uva e o café).

Assim, elucida-se que Guimarães (2015) foi escolhido como base para o desenvolvimento do objetivo principal desta tese, pois: (i) não foi encontrado na literatura nenhum modelo aderente ao contexto da pesquisa que já incorporasse dimensões ambientais (conforme descrito no Capítulo 3); (ii) dentre aqueles aplicados ao contexto brasileiro, este estava mais adequado à proposta desta pesquisa (tem o mesmo viés - planejamento estratégico governamental - e considera explicitamente as demandas par-a-par, refletindo de maneira mais acurada a dinâmica de mercado); (iii) tem aderência ao planejamento estratégico governamental e ao contexto brasileiro, uma vez que segue as características do PNLT, considerando as matrizes brasileiras de produção e consumo até 2031.

Desta maneira, faz-se necessário descrever a modelagem matemática desenvolvida por Guimarães et al. (2015) (Seção 4.1) antes de apresentar o modelo proposto nesta tese (Seção 4.2).

## 4.1 Modelo de Guimarães et al. (2015)

Trata-se de um modelo de localização-alocação capacitado, multiproduto e multicamada (embora admitam-se fluxos diretos entre O/D, sem utilização das estruturas de integração logística), que busca otimizar os custos logísticos por meio da instalação de CILs que promovam a intermodalidade. Entende-se como custos logísticos os custos de transporte (direto e por meio de um CIL), de transbordo, de abertura e operação das facilidades. Para tanto, adotam-se os seguintes pressupostos:

1. O CIL é uma estrutura simplificada que permite única e exclusivamente a transferência modal. Desta maneira, não há qualquer tipo de agregação de valor ao produto (seja transformação, embalagem, etiquetagem etc.);
2. Os CILs são selecionados a partir de um conjunto de candidatos pré-definidos, com base em critérios estabelecidos de acordo com o estudo de caso. Assim, embora não haja nenhuma exigência de abertura (como nos modelos de  $p$ -

mediana), há um número máximo, pré-fixado, de estruturas que poderão ser abertas;

3. O fluxo entre a zona de produção e consumo só será intermediado por um CIL, caso isto proporcione redução no custo total da rede. Ou seja, se a opção pelo transporte direto apresentar um custo menor do que aquele associado à utilização do CIL, opta-se pelo transporte direto (da origem para o destino final, sem passar pela estrutura de integração);
4. Há uma capacidade mínima estabelecida para abertura do CIL, visando assegurar a viabilidade econômica desta facilidade. Caso contrário, uma estrutura de integração poderia ser aberta para movimentar pequenos volumes (e.g. 2 toneladas), os quais poderiam não justificar o montante de recursos investido. Assim, um determinado CIL só será habilitado quando o volume total de carga atraída pela estrutura atingir (ou superar) a capacidade mínima;
5. De forma análoga, considera-se que cada CIL tem uma capacidade máxima de movimentação relacionada a limitações físicas/estruturais, visto que qualquer facilidade tem capacidade limitada. Assim, caso a quantidade movimentada alcance o limite máximo do CIL, nenhuma unidade adicional poderá ser enviada para esta estrutura; e
6. Em relação ao fluxo direto, estabelece-se que um determinado produto pode ser enviado diretamente a um ponto de consumo, a partir do ponto de produção, por meio de um único modo. Já o fluxo que passa por um CIL precisa, obrigatoriamente, realizar, pelo menos, uma transferência modal.

A Figura 4.1 ilustra possíveis fluxos entre os pares de origem-destino, onde se verificam áreas de demanda atendidas exclusivamente pelo transporte direto (O2-D4), unicamente pelo transporte intermodal (O2-D1, por exemplo) ou por ambos. Ressalta-se que a configuração da rede dependerá dos pressupostos do estudo de caso.

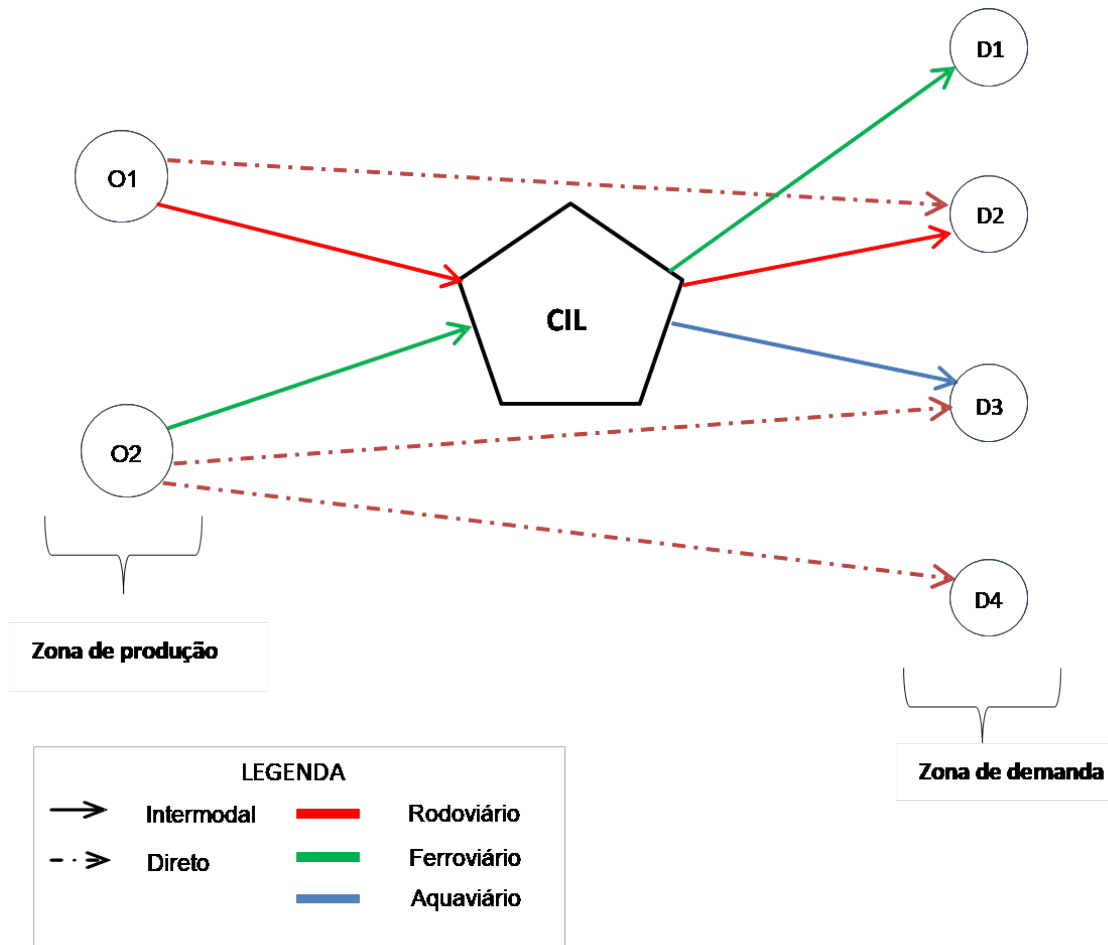


Figura 4.1: Representação de uma possível rede de transportes estabelecida entre os pares O/D

Uma vez conhecidos os pressupostos que embasaram o desenvolvimento da proposta de Guimarães (2015), detalham-se os índices, parâmetros e variáveis que compõem este modelo.

### Conjuntos e índices

- $I$  Conjunto de zonas de produção, onde  $i \in I$
- $J$  Conjunto de zonas de consumo, onde  $j \in J$
- $P$  Conjunto de produtos, onde  $p \in P$
- $K$  Conjunto de candidatos a CILs, onde  $k \in K$
- $M_{pij}^{dir}$  Conjunto de modos de transporte disponíveis para envio do produto  $p \in P$ , diretamente da zona de produção  $i \in I$  para a zona de demanda  $j \in J$
- $M_{pik}^{ent}$  Conjunto de modos de transporte disponíveis para envio do produto  $p \in P$ , da zona de produção  $i \in I$  para o CIL  $k \in K$

$M_{pkj}^{sai}$  Conjunto de modos de transporte disponíveis para envio do produto  $p \in P$ , do CIL  $k \in K$  para a zona de consumo  $j \in J$

## Parâmetros

$C_{pijm}^{dir}$  Custo unitário de transporte para o envio do produto  $p \in P$ , da zona de produção  $i \in I$  para a zona de consumo  $j \in J$  diretamente pelo modo de transporte  $m \in M_{pij}^{dir}$  (ou seja, sem passar por um CIL)

$C_{pikm}^{ent}$  Custo unitário de transporte para o envio do produto  $p \in P$ , da zona de produção  $i \in I$  para o CIL  $k \in K$  pelo modo de transporte  $m \in M_{pik}^{ent}$

$C_{pkjm}^{sai}$  Custo unitário de transporte para o envio do produto  $p \in P$ , do CIL  $k \in K$  para a zona de consumo  $j \in J$  pelo modo de transporte  $m \in M_{pkj}^{sai}$

$CT_{pkjm}^{sai}$  Custo de transbordo para o envio do produto  $p \in P$ , do CIL  $k \in K$  para a zona de consumo  $j \in J$  pelo modo de transporte  $m \in M_{pkj}^{sai}$

$g_k$  Custo de abertura de um CIL  $k \in K$

$\theta_{pk}$  Custo operacional associado ao atendimento do produto  $p \in P$ , no CIL  $k \in K$

$v_k^{min}$  Capacidade mínima requerida para abertura de um CIL  $k \in K$

$v_k^{max}$  Capacidade máxima permitida para um CIL  $k \in K$

$d_{pij}$  volume do produto  $p \in P$ , produzido na zona  $i \in I$  e demandado na zona de consumo  $j \in J$  (representando as matrizes O/D)

## Variáveis de decisão

$x_{pijm}^{dir}$  Quantidade de produto  $p \in P$  enviado, diretamente, da zona de produção  $i \in I$  para a zona de consumo  $j \in J$  pelo modo de transporte  $m \in M_{pij}^{dir}$ , ou seja, sem passar por um CIL  $k \in K$

$x_{pikm}^{ent}$  Quantidade de produto  $p \in P$ , enviado da zona de produção  $i \in I$  para o CIL  $k \in K$  pelo modo de transporte  $m \in M_{pik}^{ent}$  (esta variável representa, portanto, o fluxo de entrada em um CIL)

$x_{pkjm}^{sai}$  Quantidade de produto  $p \in P$  enviado do CIL  $k \in K$  para a zona de consumo  $j \in J$  pelo modo de transporte  $m \in M_{pkj}^{sai}$  (esta variável representa, portanto, o fluxo de saída de um CIL)

$z_k$  Variável binária que indica se o CIL  $k \in K$  está aberto ( $z_k = 1$ ) ou não ( $z_k = 0$ )

$y_{pikj}$  Variável que indica a quantidade total de produto  $p \in P$ , enviado da zona de produção  $i \in I$  para zona de consumo  $j \in J$  por meio do CIL  $k \in K$ . Esta variável garante que as matrizes O/D serão respeitadas, ou seja, que as demandas par-a-par serão atendidas.

Com isso, o modelo matemático proposto por Guimarães (2015) é apresentado a seguir.

$$\begin{aligned}
Min \quad v(\text{Guimaraes2015}) &= \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pij}^{dir}} C_{pijm}^{dir} x_{pijm}^{dir} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} C_{pikm}^{ent} x_{pikm}^{ent} \\
&+ \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \left( g_k z_k + \theta_{pk} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} x_{pkjm}^{sai} \right) + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} \left( C_{pkjm}^{sai} + CT_{pkjm}^{sai} \right) x_{pkjm}^{sai}
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{m \in M_{pij}^{dir}} x_{pijm}^{dir} + \sum_{k \in K} y_{pikj} = d_{pij} \quad \forall p \in P, i \in I, j \in J \tag{4.2}$$

$$v_k^{min} z_k \leq \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} x_{pikm}^{ent} \leq v_k^{max} z_k \quad \forall k \in K \tag{4.3}$$

$$\sum_{i \in I} y_{pikj} = \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} x_{pkjm}^{sai} \quad \forall p \in P, k \in K, j \in J \tag{4.4}$$

$$\sum_{j \in J} y_{pikj} = \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} x_{pikm}^{ent} \quad \forall p \in P, i \in I, k \in k \tag{4.5}$$

$$x_{pijm}^{dir} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in I, j \in J, m \in M_{pij}^{dir} \tag{4.6}$$

$$x_{pikm}^{ent} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in I, k \in K, m \in M_{pik}^{ent} \tag{4.7}$$

$$x_{pkjm}^{sai} \geq 0 \quad \forall p \in P, k \in K, j \in J, m \in M_{pkj}^{sai} \tag{4.8}$$

$$y_{pikj} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in I, k \in K, j \in J \tag{4.9}$$

$$z_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K \tag{4.10}$$

A Função Objetivo (4.1) visa minimizar os custos logísticos totais (transporte direto e por meio de CILs, operação e de abertura das facilidades, transbordo). As Restrições (4.2) garantem que a demanda total de cada zona de consumo será atendida (por transporte direto ou intermediado por um CIL). Garantem também que, independente do CIL eventualmente utilizado, as demandas par-a-par serão respeitadas. Já as Restrições (4.3) estão relacionadas às capacidades máximas e

mínimas de utilização de CILs, influenciando diretamente na decisão de implantá-los ou não.

As Restrições (4.4) impõem que todo o volume de um dado produto que entra em um CIL tem, de antemão, uma destinação específica, não podendo ser usado para atender a demanda de outra zona de consumo. Reforça-se, assim, o atendimento estrito às demandas par-a-par estabelecidas. As Restrições (4.6) complementam as Restrições (4.5) e estão associadas aos fluxos de saída. As demais restrições estão relacionadas ao domínio das variáveis de decisão.

Ressalta-se que, de acordo com Guimarães et al. (2017b), esta modelagem generaliza o problema de localização de facilidades capacitado multiproduto e multicamada (PLFCMM), em particular, a formulação proposta por Geoffrion e Graves (1974); sendo que sua principal contribuição, dentre outros aspectos, é o atendimento de demandas par-a-par.

Salienta-se que, adicionalmente, Guimarães (2015) propõe duas restrições opcionais que poderão ser adotadas de acordo com o viés de análise pretendido. Caso se esteja avaliando um cenário em que haja restrição orçamentária e, por conta disso, deseje-se limitar o investimento em CILs, pode-se adotar a Restrição (4.11), onde:  $F$  é o valor máximo (ou total) de recursos disponíveis para investimentos em CILs.

$$\sum_{k \in K} g_k z_k \leq F \quad (4.11)$$

Ressalta-se que, embora o custo de abertura de um CIL esteja incluído na função objetivo, considera-se que a implantação deste tipo de estrutura é de interesse estratégico governamental. Assim, caberia ao gestor público buscar fontes de financiamento, estabelecer possíveis parcerias com a iniciativa privada, entre outras alternativas que viabilizassem a construção das facilidades. Esclarece-se, portanto, que o modelo de Guimarães (2015) não tem como finalidade desenvolver um estudo de viabilidade econômico-financeira.

Entretanto, sabe-se que os recursos são finitos e limitados ao orçamento público previamente aprovado. Assim, a Restrição (4.11) é importante para avaliar cenários em que se deseje agregar essa previsão máxima de investimentos dedicados à implantação de CILs. Isto restringiria, portanto, o número de estruturas a serem abertas e, possivelmente, suas localizações.

Ainda, pode-se definir uma restrição semelhante a de  $p$ -medianas, em que a quantidade de CILs abertos seria restrita não por questões orçamentárias, mas por uma definição prévia do número máximo de estruturas que se deseja instalar (veja a Restrição (4.12)).

$$\sum_{k \in K} z_k \leq \bar{p} \quad (4.12)$$

Onde:  $\bar{p}$  representa o número máximo de CILs a serem abertos.

Assim, uma vez conhecido o modelo de Guimarães (2015), a Seção 4.2 discorre sobre a formulação matemática proposta nesta tese.

## 4.2 Modelo matemático proposto

O modelo desenvolvido nesta tese visa incorporar o critério ambiental ao processo de tomada de decisão determinado no modelo de Guimarães (2015). A partir da discussão feita no Capítulo 3, escolheu-se abordar a emissão de CO<sub>2</sub> em função: (i) do transporte ser uma das principais fontes de emissão antrópica deste gás - no ano de 2017 este setor respondeu por 45,8% das emissões totais de CO<sub>2</sub> no Brasil (EPE, 2018); (ii) deste impacto ser o mais recorrente nas publicações sobre o tema (conforme Tabela 3.4) e; (iii) desta influência ambiental ser alvo de diferentes tratados internacionais visando sua mitigação.

Neste ponto, reforça-se que o objetivo principal da implantação de estruturas de integração logística é a promoção da intermodalidade, a qual viabilizará a utilização de modos de transporte de maior capacidade e, assim, poderá proporcionar uma redução dos custos logísticos totais (pelos ganhos de eficiência associados). Dessa maneira, optou-se por restringir a análise das emissões de CO<sub>2</sub> às atividades de transporte (direta e intermediada por um CIL).

Verifica-se na literatura investigada que trabalhos anteriores também adotaram esta mesma abordagem (como evidenciado na Tabela 3.7): Elhedhli e Merrick (2012); Zheng e Zhou (2012); Xifeng, Ji e Peng (2013); Tang e Zhang (2015); Wanke et al. (2015); Zhang et al. (2015); Zhalechian et al. (2016); Anvari e Turkay (2017); Jindal e Sangwan (2017); Musavi e Bozorgi-Amiri (2017); e, Varsei e Polyakovskiy (2017). Adicionalmente, assume-se que as emissões provenientes do transporte seriam consideravelmente maiores que aquelas oriundas da operação dos CILs, tendo em vista que nestas estruturas só haveria atividades de transbordo.

Assim, considerando que:  $fe_m$  é o fator de emissão do combustível usado pela alternativa de transporte  $m \in M_{pij}^{dir}$ ,  $m \in M_{pik}^{ent}$  ou  $m \in M_{pkj}^{sai}$ ;  $dt_{pijm}$  é a distância percorrida pela alternativa de transporte  $m \in M_{pij}^{dir}$  entre as zonas de produção  $i$  e consumo  $j$  do produto  $p$ ;  $dt_{pikm}$  é a distância percorrida pela alternativa de transporte  $m \in M_{pik}^{ent}$  entre as zonas de produção  $i$  e o CIL  $k$  no transporte do produto  $p$ ;  $dt_{pkjm}$  é a distância percorrida pela alternativa de transporte  $m \in M_{pkj}^{sai}$  entre o CIL  $k$  e a zona de consumo  $j$  do produto  $p$ ; e  $C^{cap}$  é valor máximo permitido para emissão de carbono, têm-se o modelo apresentado a seguir.



$$\begin{aligned}
Min \quad z_1 = & \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pij}^{dir}} C_{pijm}^{dir} x_{pijm}^{dir} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} C_{pikm}^{ent} x_{pikm}^{ent} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \left( g_k z_k + \theta_{pk} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} x_{pkjm}^{sai} \right) \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} \left( C_{pkjm}^{sai} + CT_{pkjm}^{sai} \right) x_{pkjm}^{sai}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned}
Min \quad z_2 = & \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pij}^{dir}} f e_m dt_{pijm} x_{pijm}^{dir} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} f e_m dt_{pikm} x_{pikm}^{ent} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} f e_m dt_{pkjm} x_{pkjm}^{sai}
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Sujeito a: Restrições (4.2) a (4.10)

$$\begin{aligned}
& \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pij}^{dir}} f e_m dt_{pijm} x_{pijm}^{dir} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} f e_m dt_{pikm} x_{pikm}^{ent} \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} f e_m dt_{pkjm} x_{pkjm}^{sai} \leq C^{cap}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Percebe-se, então, que se trata de um modelo biobjetivo que visa minimizar os custos logísticos totais da rede (Função Objetivo (4.13)) e minimizar a emissão de CO<sub>2</sub> proveniente tanto do transporte direto, quanto por meio dos CILs (Função Objetivo (4.14)). Reforça-se que, inicialmente, não se deseja considerar as emissões provenientes da estrutura de integração, tendo em vista que a única atividade nela desenvolvida é o transbordo. Assim, acredita-se que a emissão do transporte superaria, em escala, a emissão no CIL. Não obstante, modelos futuros podem incorporar a emissão dentro da estrutura (o que se torna mais relevante à medida que processos como transformação e armazenagem passam a ser executados nestas). Salienta-se, ainda, que  $z_1$  é a Função Objetivo proposta por Guimarães (2015).

Adicionalmente, ao considerar a Restrição (4.15), permite-se avaliar a possível adoção de uma política semelhante à *carbon cap*. Neste caso, o modelo deveria indicar as localizações ótimas de CILs, considerando, também, uma limitação em relação à quantidade máxima de emissões de de CO<sub>2</sub> permitidas ao setor. De maneira similar ao modelo de Guimarães (2015), podem-se aplicar as Restrições (4.11) e (4.12) para aqueles cenários já mencionados na Seção 4.1.

Neste ponto, vale ponderar que as emissões podem ser taxadas (conforme a

política *carbon tax*) e que cada dimensão (no caso em estudo, econômica e ambiental) pode ter um peso associado ao seu grau de importância no processo de planejamento estratégico do setor de transportes. Assim, o modelo matemático apresentado pode ser reescrito conforme descrito a seguir.

$$\begin{aligned}
Min \quad v(CILambiental) = & \alpha \left[ \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pij}^{dir}} C_{pijm}^{dir} x_{pijm}^{dir} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} C_{pikm}^{ent} x_{pikm}^{ent} \right. \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \left( g_k z_k + \theta_{pk} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} x_{pkjm}^{sai} \right) + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} (C_{pkjm}^{sai} + CT_{pkjm}^{sai}) x_{pkjm}^{sai} \left. \right] \\
& + \beta \left[ C_c \left( \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pij}^{dir}} f e_m dt_{pijm} x_{pijm}^{dir} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} f e_m dt_{pikm} x_{pikm}^{ent} \right. \right. \\
& \left. \left. + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} f e_m dt_{pkjm} x_{pkjm}^{sai} \right) \right]
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Sujeito a: Restrições (4.2) - (4.10); e (4.15)

Onde:  $C_c$  é custo associado à emissão de  $CO_2$ ;  $\alpha$  é o peso associado à dimensão econômica; e  $\beta$  é o peso associado à dimensão ambiental.

Nota-se, portanto, que o modelo se tornou mono-objetivo, em que se deseja minimizar uma única Função Objetivo financeira (representada em (4.16)), que envolve tanto os custos logísticos (transporte, transbordo, abertura e operação de CILs), quanto os custos associados à emissão de  $CO_2$  nesta rede. Adota-se, portanto, uma política semelhante à *carbon tax*, em que se impõe uma taxa à emissão de carbono (representada por  $C_c$ ).

Assim, o modelo proposto permite avaliar cenários aderentes a duas políticas internacionais de regulamentação de carbono apresentadas em Fareeduddin et al. (2015): a *carbon tax* (por meio do termo ambiental na Função Objetivo (4.16)) e a *carbon cap* (representada pela Restrição (4.15)). Salienta-se a opção de não adotar a possibilidade de comercialização de créditos de carbono (política *carbon trade* ou *carbon cap-and-trade*) tendo em vista que este mercado ainda não é obrigatório no Brasil.

Esclarece-se que, de acordo Souza, Alvarez e Andrade (2013), o protocolo de Kyoto propôs três mecanismos voltados para redução das emissões de GEEs: (i) o comércio de emissões; (ii) a implementação conjunta, em que países com metas fixadas pelo Protocolo de Kyoto podem adquirir de países desenvolvidos Unidades

de Redução de Emissões e; (iii) Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, que são projetos voltados para redução das emissões. Destes, apenas o terceiro contempla a participação voluntária de países em desenvolvimento, como o Brasil.

Ressalta-se que os projetos desenvolvidos na terceira categoria podem gerar certificados de emissão reduzida de carbono a serem comercializados (conforme evidenciado em Brasil, 2017). No entanto, o mercado de carbono ainda não está amadurecido no país. Para compreender as nuances da possível implementação do comércio de carbono no Brasil, sugere-se a leitura de CEBDS (2016 e 2018).

Por fim, nota-se na nova Função Objetivo (4.16) a existência de parâmetros ( $\alpha$  e  $\beta$ ) que representam os pesos associados às dimensões econômica e ambiental. Com isso, a ideia é conduzir análises de sensibilidade, a partir das alterações nos pesos das dimensões (conforme proposto no objetivo específico (v)).

Uma vez apresentado o modelo matemático proposto nesta tese, o Capítulo 5 discorre sobre os parâmetros da rede adotados para a aplicação do modelo e, consequente, análise do caso selecionado.

# Capítulo 5

## Parâmetros do estudo de caso

Para atender ao objetivo específico (iv) deste trabalho, o modelo matemático proposto foi aplicado ao contexto brasileiro, considerando as matrizes origem-destino (O/D) dos quatro principais produtos agrícolas (soja, milho, farelo de soja e açúcar) e a rede de transporte multimodal do PNLT. Os resultados estão detalhados no Capítulo 6.

A escolha do contexto brasileiro se deu pelas especificidades apresentadas no Capítulo 1, a se destacar, principalmente: (i) a ineficiência logística estrutural que impacta negativamente diversos setores da economia; e (ii) o fato dos planos logísticos reconhecerem a implantação de estruturas de integração como um objetivo estratégico do processo de planejamento para que se possa tornar o setor de transporte mais eficiente.

Além disso, assinala-se a pouca representatividade dos problemas de localização de facilidades desenvolvido por pesquisadores brasileiros, especificamente quando se deseja associar a dimensão ambiental aos modelos de otimização (conforme Capítulo 2). A escolha do PNLT, por sua vez, é justificada pela relevância deste plano para o setor de transportes brasileiro, conforme abordado no Capítulo 1. Assim, a maioria dos parâmetros adotados no estudo de caso é proveniente deste plano estratégico.

Este capítulo se dedica à apresentação dos parâmetros usados na aplicação do modelo matemático, os quais estão apresentados na seguinte ordem: (i) zoneamento do território brasileiro (Seção 5.1); (ii) produtos selecionados e respectivas matrizes O/D (Seção 5.2); (iii) redes de transporte (Seção 5.3) (iv) candidatos a CIL (Seção 5.4); (v) custos logísticos (Seção 5.5); e, (vi) matriz de emissão de carbono (Seção 5.6).

### 5.1 Zoneamento do território brasileiro

O PNLT prevê o zoneamento do território brasileiro em microrregiões homogêneas, para as quais é feito todo o planejamento de transporte previsto neste

plano estratégico. Para o desenvolvimento do estudo de caso desta tese, adotou-se o mesmo zoneamento do PNLT, o qual se baseia nos seguintes critérios:

1. A unidade espacial mínima de cada zona de transporte deve respeitar os limites municipais. Portanto, a extensão territorial municipal deve ser considerada em sua totalidade, não sendo permitida a inclusão de apenas parte de um ou mais municípios;
2. Embora as zonas possam agregar diferentes municípios, é recomendável que elas correspondam a alguma unidade espacial adotada pelo IBGE (microrregiões ou mesorregiões homogêneas). Com isso, acredita-se facilitar a obtenção dos dados socioeconômicos e de produção e consumo;
3. A densidade da malha de transporte deve ser considerada como critério de zoneamento. Assim, regiões com maior densidade – como o Sudeste brasileiro – devem ser subdivididas em um maior número de zonas; e,
4. Os fluxos de importação ou exportação também devem ser considerados.

Com isso, são estabelecidas 559 microrregiões (conforme Figura 5.1), distribuídas no território brasileiro da seguinte forma: 64 localizadas no norte, 188 no nordeste, 160 no sudeste, 94 no sul e 52 no centro-oeste. Além disso, há uma microrregião que não aparece visualmente no mapa, mas que representa os fluxos internacionais (importação e exportação).



Figura 5.1: Zoneamento do território brasileiro - PNLT

Fonte: MT (2012)

Ressalta-se que, por questões de simplificação, considera-se o exterior como uma única região, não importando o país de origem (no caso de importação) ou destino (no caso de exportação). Assim, basta identificar se determinado produto é direcionado ao consumo interno (podendo ser destinado a uma das 558 microrregiões, de acordo com sua matriz O/D) ou ao comércio internacional (sendo destinado a região “exterior”). Para maiores detalhes, sugere-se a leitura do próprio PNLT (MT, 2007, 2009 e 2012).

Uma vez compreendido o zoneamento, torna-se relevante determinar as matrizes O/D dos produtos selecionados, tendo em vista que isto influenciará diretamente nos custos e na rede de transporte adotada para solução do caso descrito (Seção 5.3).

## 5.2 Produtos selecionados e matrizes O/D

Com base no Sistema de Contas Nacionais (SCN) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), de maneira integrada à Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) e à lista de produtos (PRODLIST), a segunda versão do PNLT estabeleceu um método de classificação dos 110 bens e serviços identificados no SCN, relacionando-os a 55 atividades produtivas.

Assim, os produtos foram agrupados em cinco categorias, de acordo com sua tipologia e o processo de transporte de cargas. Para tanto, consideraram-se os seguintes critérios (MT, 2012): (i) a forma de comercialização e distribuição dos produtos; (ii) os tipos de movimentação e portabilidade das cargas; (iii) as alterações na relação entre *quantum* (toneladas) e valor monetário do produto transportado de acordo com as etapas de sua cadeia produtiva; e (iv) a disponibilidade de informações confiáveis. A Tabela C.1, no Apêndice C, apresenta a categorização de produtos em grupos, evidenciando as principais características de cada um deles e as mercadorias que os compõem.

Para justificar a escolha dos quatro produtos adotados nesta tese, cabe enfatizar que se considera o CIL como uma estrutura simplificada, voltada unicamente para consolidação de carga e transbordo - preferencialmente - para modos de maior capacidade (pois isso permitiria ganhos de escala e, conseqüentemente, reduções nos custos de transporte). Assim, os produtos pertencentes aos Grupos 3, 4 e 5, da Tabela C.1 poderiam ser descartados.

Tendo em vista que o Grupo 2 concentra produtos com menores volumes de transporte, entende-se que os ganhos de escala potenciais seriam menores que àqueles do Grupo 1, incorrendo-se no risco de não serem suficientes para viabilizar a intermodalidade (Guimarães, 2015; Meisel, Krischstein e Bierwirth, 2013). Portanto, os produtos pertencentes ao Grupo 2 também foram desconsiderados.

Dentre os produtos do Grupo 1, aqueles com maior relevância para a matriz de cargas nacional (desconsiderando a carga geral e o minério de ferro) são os agrícolas e agroindustriais (Costa, 2014; Guimarães, 2015). Além disso, são aqueles com maior potencial de intermodalidade. Portanto, a análise estaria restrita aos seguintes produtos: cana-de-açúcar; celulose e outras pastas para fabricação de papel; automóveis, milho em grão; óleo de soja em bruto e tortas, bagaços e farelo de soja; produtos da exploração florestal e da silvicultura; produtos das usinas e do refino de açúcar; semi-acabados, laminados planos, longos e tubos de aço; e, soja em grão (Guimarães, 2015).

Assim, optou-se por quatro produtos cuja relevância na matriz nacional é reconhecida: soja, milho, farelo de soja e açúcar. As matrizes de produção e consumo por microrregião estimadas para o ano de 2031 para os produtos selecionados podem ser obtidas nos relatórios da segunda versão do PNLT (MT, 2012). Não obstante, as Figuras 5.2, 5.4, 5.3 e 5.5 apresentam a distribuição geográfica da produção e do consumo prevista para 2031, no mercado interno, dos produtos soja, milho, farelo de soja e açúcar, respectivamente. Já as matrizes O/D consolidadas por região do IBGE (incluindo os fluxos de internacionais) estão disponíveis no Apêndice D. Ressalta-se que, a escala das figuras mencionadas são diferentes, pois os volumes de produção e consumo de cada produto também o são.

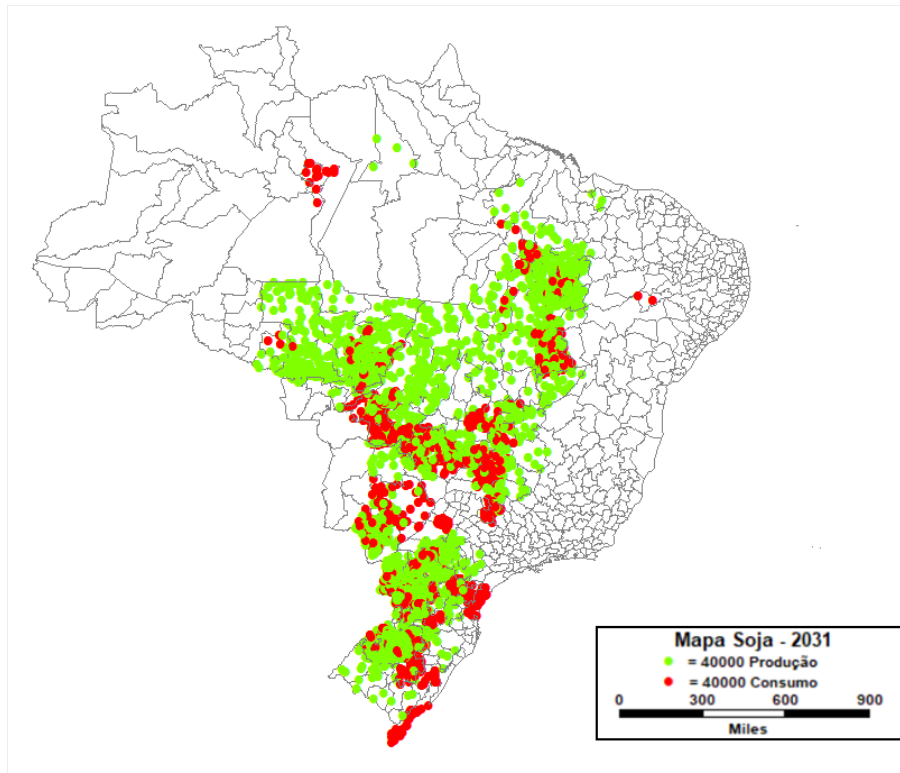


Figura 5.2: Distribuição geográfica da produção e do consumo de soja previstos para 2031

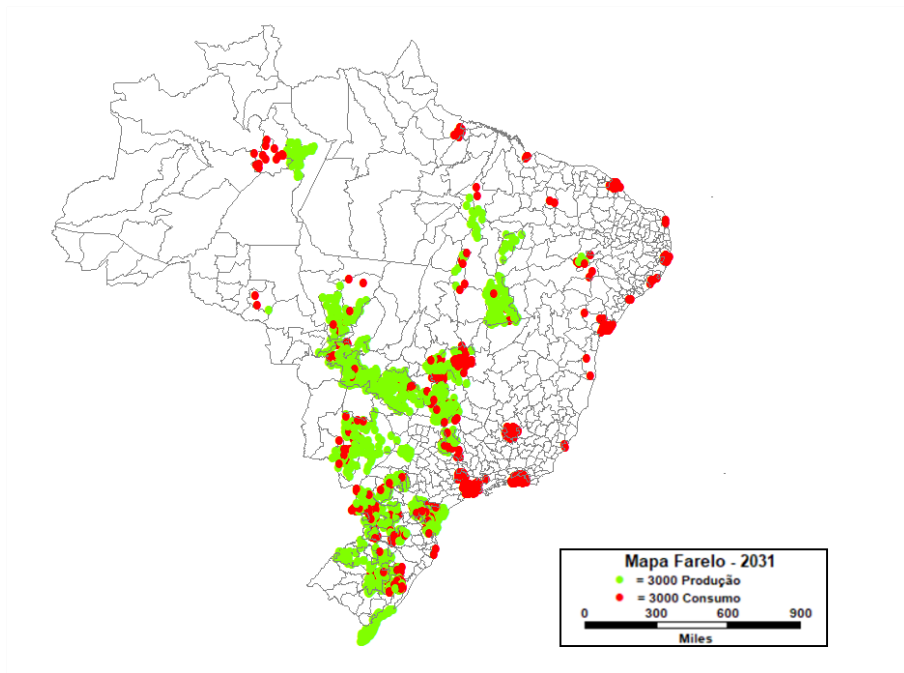


Figura 5.3: Distribuição geográfica da produção e do consumo de farelo de soja previstos para 2031

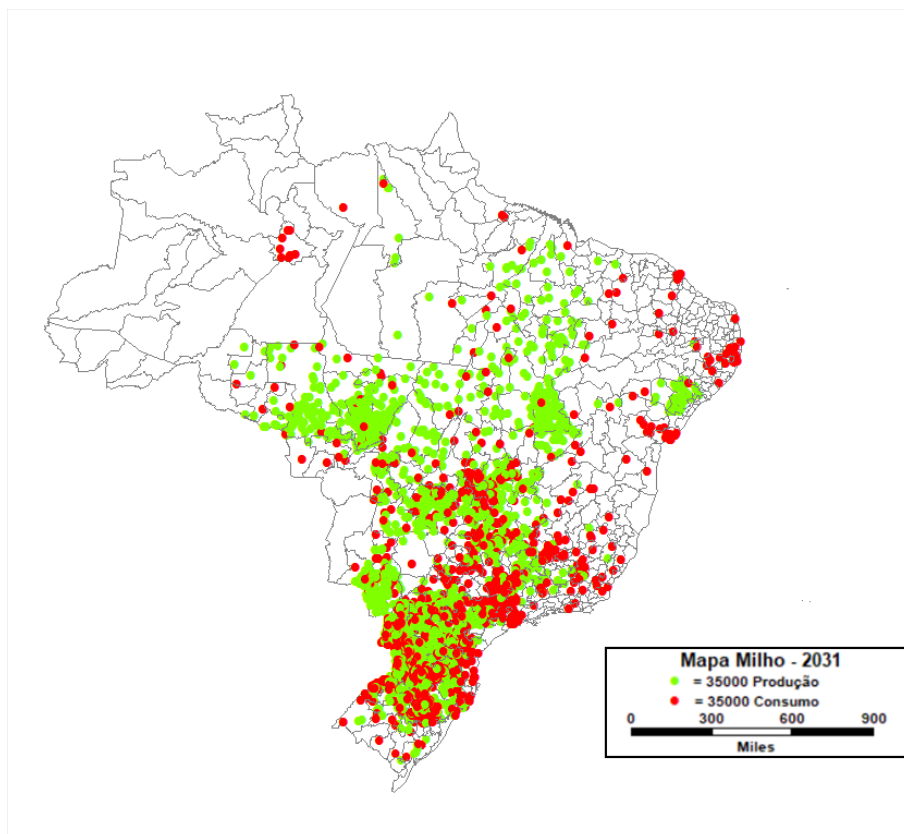


Figura 5.4: Distribuição geográfica da produção e do consumo de milho previstos para 2031



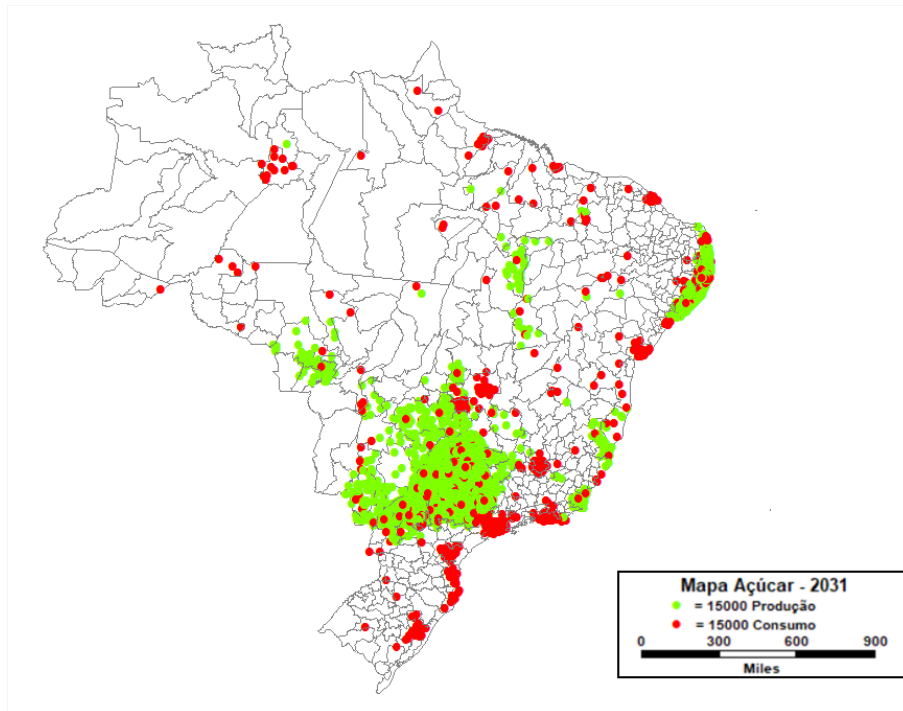


Figura 5.5: Distribuição geográfica da produção e do consumo de açúcar previstos para 2031

### 5.3 Redes de transporte

Para testar o modelo matemático proposto, adotou-se a rede de transporte multimodal do PNLT prevista para o ano de 2031. Salienta-se que a rede de 2031 é uma atualização da rede estabelecida para o ano de 2023, feita durante segunda revisão do plano.

Em sua primeira versão, a rede multimodal do PNLT sugerida para o ano de 2023 considerava a malha de transporte existente e os projetos de infraestrutura existentes até a elaboração daquela versão do plano. Costa (2014) destaca que a base georreferenciada continha mais de 16.260 segmentos, considerando a rede multimodal, sendo que aproximadamente 76% deles eram rodoviários (atuais e planejados para 2023).

Destaca-se que a rede prevista para 2023 já permitia a identificação de conexões intermodais, ou seja, os pontos de conexão entre rodovias, hidrovias e ferrovias. Este fato é relevante, pois a existência de trechos que possibilitem a intermodalidade torna a microrregião uma potencial candidata a receber CILs. Potencial, pois o Projeto CIL estabelece outros critérios relevantes para definição das regiões candidatas - como a não proximidade a reservas indígenas (SPNT, 2016) - que foram replicados neste trabalho.

Elucida-se que são considerados como possíveis pontos de transbordo e trans-

ferência modal: os portos secos, os armazéns de grãos, as indústrias esmagadoras de soja e as conexões intermodais acima mencionadas. Sendo assim, a versão inicial do plano contabilizava 476 pontos de transferência rodo-ferroviária e 86 conexões rodo-hidroviária, totalizando 562 pontos de transbordo.

Com a revisão e o lançamento da segunda versão do PNLT, tais dados foram atualizados incluindo, por exemplo, a possibilidade do transporte por meio de cabotagem. Detalhes desta atualização podem ser obtidas no Relatório 2, intitulado “Caracterização da Oferta”<sup>1</sup>. A Figura 5.6 ilustra a rede multimodal prevista para o ano de 2031. Salienta-se que as atualizações e projetos de infraestrutura de transporte indicados em programas governamentais, previstos ou executados a partir da atualização do PNLT não foram considerados nesta tese e, portanto, também não estão na Figura 5.6.



Figura 5.6: Rede multimodal do PNLT

Fonte: MT (2012)

Ressalta-se que, no estudo de caso, foram assumidos alguns pressupostos associados à rede de transporte. Tendo em vista que o PNLT propõe um reequilíbrio

<sup>1</sup>Até setembro de 2019, os relatórios estavam disponíveis no seguinte endereço: <http://www.transportes.gov.br/conteudo/2814-pnlt-plano-nacional-de-logistica-e-transportes.html>. Dessa forma, optou-se por não detalhar as atualizações específicas da rede nesta seção.

da matriz de transporte de carga a partir de uma maior participação dos modos ferroviário e aquaviário, arbitrou-se que toda carga intermediada por um CIL deve, necessariamente, ser transbordada para uma opção intermodal que envolva, pelo menos, um desses dois modos mencionados (a depender da disponibilidade da malha), privilegiando a opção de menor custo total.

Portanto, assume-se que o local de destino tem infraestrutura (terminais e equipamentos) para receber a carga ferroviária ou aquaviária, quando necessário. Esclarece-se que a opção intermodal pode envolver transbordo após o CIL, cujos custos não foram considerados por questões de simplificação. Além disso, o transporte rodoviário pode compor uma das opções intermodais.

Em resumo, para o transporte direto (entre  $i$  e  $j$ ) e de entrada no CIL (entre  $j$  e  $k$ ) considerou-se apenas uma opção unimodal, totalmente rodoviária. Já para o transporte de saída do CIL (entre  $k$  e  $j$ ), adotou-se uma matriz intermodal. No caso dos produtos soja, farelo de soja e milho aplicou-se uma base de composição rodo-ferro-hidroviária para o trecho intermodal. Já para o açúcar, optou-se pelo uso de uma matriz rodo-ferroviária. Tais matrizes foram obtidas a partir da identificação dos caminhos mínimos entre cada par O/D (diretamente e por meio de um CIL) da base multimodal do PNLT.

Esclarece-se que a opção pelo transporte direto ser feito de maneira exclusivamente rodoviária se deu em virtude: da concentração da matriz brasileira de transporte de cargas ser neste modo (cerca de 60%, de acordo com o PNLT) e da característica dos produtos, que são majoritariamente transportados por rodovia. Já a adoção do transporte intermodal como saída do CIL é justificada pelo fato desta estrutura ser instalada visando promover a integração modal.

Uma vez apresentadas as características da rede de transporte, faz-se necessário discorrer sobre os candidatos a CIL, tendo em vista que os fluxos da rede dependerão das localizações indicadas pelo modelo, as quais respeitaram a lista de candidatos pré-selecionados.

## 5.4 Candidatos a CIL

Dentre as 559 microrregiões apresentadas na Seção 5.1, foram selecionadas 187 candidatas a sediarem a instalação de CILs (conforme Figura 5.7). Para tanto, foram seguidos os critérios estabelecidos no projeto CIL (SPNT, 2016): (i) disponibilidade de conexão de, pelo menos, dois modos de transporte; e, (ii) concentração de 80% da produção do grupo de cargas em estudo. O primeiro item é essencial para a efetivação da intermodalidade. O segundo, por sua vez, está em consonância com Chopra e Meindl (2016) de que a proximidade das zonas produtoras é um dos critérios relevantes para localização de instalações logísticas.

Enfatiza-se que, no relatório do Projeto CIL (SPNT, 2016), estão pré-definidos o conjunto de CILs candidatos para cada grupo de carga do PNLT, atendendo aos critérios mencionados. Pela categorização feita no Projeto, os produtos soja, milho e farelo de soja pertenceriam ao grupo “Granéis Vegetais”, enquanto o açúcar faria parte de “Embalados-RodoFerro”. Assim, como nesta tese apenas quatro produtos de diferentes grupos foram considerados, as microrregiões candidatas precisaram ser novamente selecionadas<sup>2</sup>.

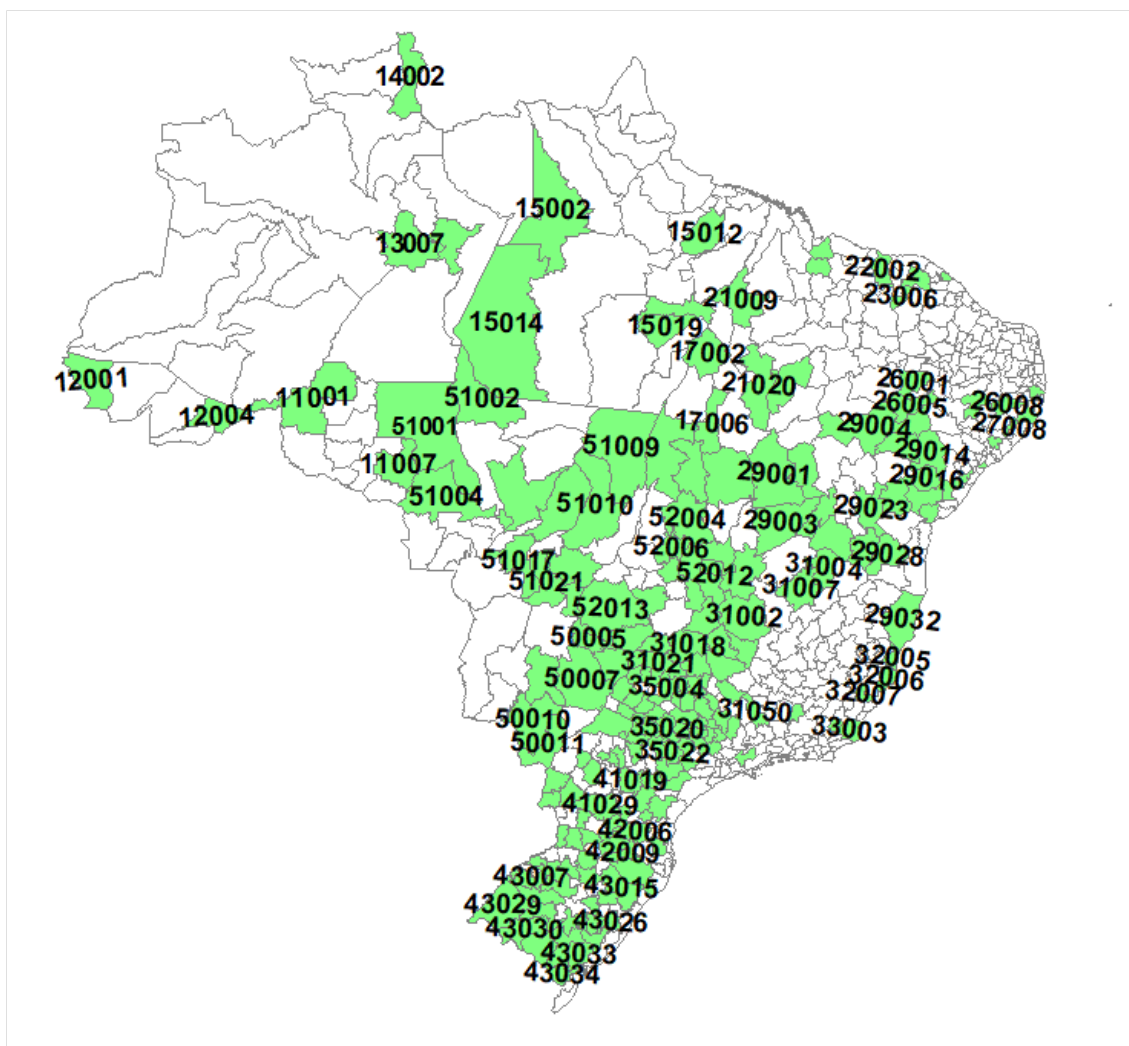


Figura 5.7: Microrregiões candidatas a localização de CILs

Inicialmente, consolidaram-se as regiões candidatas pertencentes tanto ao grupo “Granéis Vegetais”, quanto ao “Embalados-RodoFerro”. Na sequência,

<sup>2</sup>No Relatório 5 - Tomo I consta que: “Considerando ainda que é de interesse para este relatório aqueles locais que respeitem os critérios: (i) estar entre as estruturas de integração que atraem os maiores volumes de cargas; (ii) ser atrativo para mais de um grupo de cargas; (iii) estar preferencialmente conectado a um segmento ferroviário pertencente ao PIL; e (iv) identificar, dentre as microrregiões contempladas pelo PIL, aquelas em que haja a integração de mais de dois modos de transportes”(SPNT, 2016, p.94)”. Para compreender melhor a dinâmica específica adotada no Projeto CIL, recomenda-se a leitura do Relatório 5.

selecionaram-se apenas àquelas que fossem coincidentes às regiões de produção de, pelo menos, um dos quatro produtos. No caso dos candidatos oriundos do grupo “Embalados-RodoFerro”, considerou-se apenas os pontos coincidentes com as regiões produtoras de açúcar, tendo em vista que sua rede de transporte é diferenciada dos demais produtos, conforme evidenciado na Seção 5.3. Se considerasse o milho, por exemplo, incorreria-se no risco de selecionar uma região com disponibilidade de transporte apenas rodo-ferroviário, enquanto a opção de transporte adotada para este produto é a rodo-ferro-hidroviária. Em seguida, foram removidas as regiões localizadas em zonas portuárias, por se considerar que o porto, por definição é um CIL e, usualmente, já faz parte da rede de transporte dos produtos voltados para importação/exportação.

Dessa maneira, foram selecionados 187 candidatos, cuja distribuição espacial está apresentada na Figura 5.7. Salienta-se que 17 candidatos estão na região Norte, 39 na Nordeste, 27 na Centro-oeste, 55 na Sudeste e 49 na Sul, o que está coerente com as zonas de produção dos quatro produtos selecionados, conforme Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5. Por fim, esclarece-se que a lista nominal dos candidatos pode ser encontrada no Apêndice E (Tabela E.1).

## 5.5 Custos logísticos

No que diz respeito aos custos logísticos, adotaram-se os mesmos valores aplicados por Costa (2014), Guimarães (2015) e SPNT (2016). Assim, assumiu-se que os custos variáveis (incluindo transbordo) seriam equivalentes a R\$ 8,17/t, enquanto os custos de abertura variariam de acordo com cada um dos cenários estabelecidos no Capítulo 6.

Quanto aos custos de transporte, estes foram obtidos por meio da utilização das mesmas curvas de frete adotadas no Projeto CIL, para cada grupo de produto selecionado (SPNT, 2016).

## 5.6 Emissão de carbono

A literatura indica duas metodologias para mensurar a emissão de carbono: (i) *bottom up* (também conhecida como *energy-based analysis*); e (ii) *top down* (ou *activity-based analysis*) (CEFIC e ETCA, 2011; CLECAT, 2012). A primeira seria mais acurada, pois leva em consideração o consumo de combustível e/ou uso de energia, por tipo de fonte de energia, para estimar as emissões. A segunda, por sua vez, leva em conta o volume de carga transportado e a distância percorrida por cada alternativa de transporte. Ambas, no entanto, baseiam-se em fatores de emissão/conversão pré-definidos.

O *guideline* elaborado por CEFIC e ETCA (2011) indicam que o método *energy-based* seria o mais indicado para avaliar as emissões das atividades de transporte. Recomendam, ainda, a combinação entre o *energy-based* e o *activity-based* para os casos em que algumas atividades de transporte são subcontratadas. No entanto, muitas vezes, não há dados completos disponíveis para aplicação do método *bottom up* (como, por exemplo, o consumo de combustível; que, por sua vez, depende de características estruturais do veículo, idade média da frota etc.). Nessas situações, pode-se optar pelo método *activity-based*.

Na presente tese, tendo em vista que se aborda o planejamento estratégico, não é possível definir, *a priori*, a quantidade de combustível que seria consumida para atender às demandas, respeitando as matrizes O/D e a disponibilidade de infraestrutura de transporte. Dessa forma, optou-se pela adoção da *activity-based analysis*, conforme apresentado nas Expressões (4.14) e (4.15) do modelo matemático proposto.

Para aplicação do modelo ao estudo de caso, foram obtidos na literatura, os fatores de emissão usados para estimar a emissão de CO<sub>2</sub> para cada alternativa de transporte, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Fatores de emissão de carbono encontrados na literatura (em gCO<sub>2</sub>/tkm)

Fonte	EEA (2012)		CEFIC e ECTA (2011)	United Nations (2014)	Nikander (2008)	Delft (2017)
	Min.	Max.	Média	Média	Média	Média
Rodoviário	62	110	62	86	72	82
Ferroviário	18	35	22	20	-	18
Marítimo	2	7	8,4	-	*	10 a 20
Navegação de interior	30	49	31	40	17	21 a 30

Notas: “-” indica que não há menção a este modo na fonte pesquisada; “\*” indica que o fator de emissão foi apresentado apenas em g/t combustível consumido, o que não é aplicável a esta pesquisa.

As referências indicadas na Tabela 5.1 dizem respeito a relatórios internacionais e/ou *guidelines* que orientam como a emissão de carbono deveria ser mensurada em diferentes contextos. Tem-se, por exemplo, o *handbook* “STREAM Freight Transport 2016”, lançado em 2017 pela Delft (Otten, Hoen e den Boer, 2017) cujo foco é oferecer informações associadas a fatores de emissão, métodos de cálculo e aplicações às diferentes alternativas de transporte, em contextos diversos.

Pode-se citar, também, o *guideline* redigido, em conjunto, pela *The European Chemical Industry Council* - CEFIC e *The Chemical Logistic Association* - ECTA

(2011) que estabelece maneiras de mensurar as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do transporte de carga.

Assim, as matrizes de emissão foram elaboradas considerando as distâncias rodoviárias e intermodais entre todas as origens ( $i, k$ ) e destinos ( $k, j$ ), quando aplicável. Origens e destinos coincidentes receberam valores iguais a zero, tendo em vista que o viés de planejamento é estratégico. Dessa maneira, independente da localização dentro da microrregião, definiu-se que se a produção e o consumo fossem dentro de uma mesma zona, atribuiria-se valor igual a zero. Assim, foram geradas três tipos de matrizes para cada tipo de transporte (rodoviário ou intermodal), considerando o fator de emissão médio (referencial), mínimo (otimista) e máximo (pessimista) encontrados na literatura. O valor médio foi obtido a partir da média das médias apresentadas na Tabela 5.1.

No que diz respeito ao custo associado à emissão de carbono, adotou-se o valor de R\$ 93,02/t emitida, que foi estimado com base no valor médio de abertura do crédito de carbono no mercado financeiro (recorte histórico de doze meses) e a taxa de conversão do euro na data da busca. O valor médio da venda de crédito de carbono no recorte temporal de 24 de maio de 2018 a 24 de maio de 2019 (Investing.com, 2019) foi equivalente a € 20,67. Já a taxa de conversão adotada foi a cotação comercial do dia 24 de maio de 2019, sendo € 1,00 = R\$ 4,50 (Uol, 2019). A cotação comercial do euro no mesmo recorte temporal foi de R\$ 4,40. Em função da pequena diferença, optou-se por adotar o valor mais recente.

Uma vez apresentados os parâmetros usados para teste do modelo matemático proposto, o Capítulo 6 detalha os cenários estabelecidos bem como os principais resultados obtidos em cada um deles.

## Capítulo 6

# Aplicação do modelo matemático proposto

Este capítulo se dedica à apresentação dos resultados obtidos a partir da aplicação do modelo matemático proposto no Capítulo 4 aos parâmetros apresentados na Seção 5, nos diferentes cenários estabelecidos. Esclarece-se que, inicialmente, o objetivo específico (v) visava avaliar o comportamento do modelo a partir de uma análise de sensibilidade com alteração nos pesos dados às dimensões econômica e ambiental da Função Objetivo. No entanto, a partir da obtenção dos resultados iniciais, novos cenários foram determinados de maneira a verificar o comportamento do modelo e da rede, em questão. Incluiu-se, por exemplo, a avaliação do comportamento da rede a partir da análise de políticas de regulamentação de carbono identificadas no Capítulo 3.

Dessa maneira, foram estabelecidos oito cenários: (i) referencial (Seção 6.1.1); (ii) otimista e pessimista (Seção 6.1.2); (iii) sensibilidade (Seção 6.1.3); (iv) *carbon cap* (Seção 6.1.4); (v) *carbon tax* e *carbon cap* (Seção 6.1.5); (vi) *carbon tax* restritiva (Seção 6.1.6); (vii) custo de instalação do CIL e *carbon tax* (Seção 6.1.7); e, (viii) determinação do número de facilidades a serem abertas (semelhante a p-medianas) (Seção 6.1.8). Detalhes específicos dos cenários estão apresentados em suas respectivas seções, bem como na Tabela 6.1.

Antes de discorrer sobre os resultados, torna-se relevante apresentar os tempos computacionais associados a resolução de cada cenário (Tabela 6.1). Dadas as diversidades de informações que precisaram ser agregadas para solução do modelo (conforme os parâmetros apresentados na Seção 5), foi necessário contar com o apoio de um programa implementado em GISDK e outro em linguagem de programação C++. A linguagem GISDK foi usada para extrair as informações da rede georreferenciada do PNLT. Para resolver o modelo matemático proposto, usou-se o *software* de otimização IBM ILOG CPLEX 12.8 (IBM, 2017) em um computador com processador Intel CORE i7-6500U e 8GB de memória RAM, rodando o sistema



operacional UBUNTU 19.04 GNOME 3.32.1.

Tabela 6.1: Tempos computacionais de solução de cada cenário

Seção	Emissão	$\alpha$	$\beta$	$C_c$ (R\$)	$C^{cap}$ (t)	$g_k$ (R\$)	$\bar{p}$ (qtd)	Tempo (s)
6.1.1	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	40,89
6.1.2	Max	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	62,40
	Min	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	46,82
6.1.3	Med	1	0	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	48,83
	Med	0,1	0,9	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	110,01
	Med	0,2	0,8	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	62,85
	Med	0,3	0,7	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	54,07
	Med	0,4	0,6	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	71,92
	Med	0,6	0,4	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	49,44
	Med	0,7	0,3	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	55,56
	Med	0,8	0,2	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	57,40
	Med	0,9	0,1	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	52,48
	Med	0	1	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	34,38
6.1.4	Med	0,5	0,5	0,00	7.849.136,36	1,00	L	1.207,08
6.1.5	Med	0,5	0,5	93,02	7.849.136,36	1,00	L	1.020,78
	Med	0	1	93,02	7.849.136,36	1,00	L	78,02
	Med	0,5	0,5	1000	7.849.136,36	1,00	L	1.688,31
6.1.6	Med	0,5	0,5	1.000	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	56,87
	Med	0,5	0,5	5.000	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	45,44
	Med	0,5	0,5	10.000	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	48,72
	Med	0,5	0,5	50.000	$1 \times 10^{20}$	1,00	L	42,84
6.1.7	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	$3 \times 10^7$	L	45,10
	Med	0,5	0,5	93,02	7.849.136,36	$3 \times 10^7$	L	2.207,36
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^8$	L	725,46
	Med	0,5	0,5	93,02	7.849.136,36	$1 \times 10^8$	L	1.376,18
6.1.8	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	0	0,32
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	10	11.730,66
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	20	1.297,64
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	30	172,53
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	40	60,73
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	50	52,32
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	60	24,27
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	70	32,78
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	80	28,74
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	90	70,36
	Med	0	1	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	45	137,44
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	45	36,47
	Med	1	0	93,02	$1 \times 10^{20}$	1,00	45	43,18

Notas: Med = matriz de emissão média; Max = Matriz de emissão máxima; Min = Matriz de emissão mínima;  $\bar{p}$  = número de facilidades a serem abertas; L = livre, ou seja, não foi especificado, *a priori*, o número de facilidades a serem abertas.

Esclarece-se que, em nenhum cenário, impôs-se valor máximo para investimentos em CILs. Por isso, este parâmetro (termo  $F$  da Restrição (4.11)) não aparece na Tabela 6.1. Além disso, adotou-se um volume mínimo ( $v_k^{min}$ ) de abertura equivalente a 1.000.000 t em todos os cenários, ao passo que não foi estabelecido volume máximo ( $v_k^{max}$ ). Observa-se que, conforme a complexidade do problema aumenta (seja pela imposição de uma pequena quantidade de facilidades a serem abertas ou pela limitação da emissão de carbono, por exemplo), maior é o tempo de solução. O maior tempo computacional foi observado quando se impôs  $\bar{p} = 10$  facilidades.

Uma vez apresentados os tempos computacionais, as seções que se seguem discorrem sobre os resultados obtidos em cada um dos cenários estabelecidos. Enfatiza-se que, neste capítulo, considera-se como custo logístico a dimensão econômica da função objetivo do modelo proposto, envolvendo, portanto, custos de transporte (direto e por intermédio de um CIL), associados à abertura e à operação de um CIL e de transbordo. Já a dimensão ambiental é chamada de custo de carbono ou custo de emissão de CO<sub>2</sub>. Assim, o custo total é composto pelas parcelas de custo logístico e custo de emissão.

## 6.1 Análise dos resultados

Esta seção se dedica a apresentação dos resultados obtidos em cada um dos cenários definidos.

### 6.1.1 Aplicação: Cenário referencial

Entende-se como cenário referencial, também conhecido como *Business as Usual*, aquele base, ao qual os demais são comparados. Dessa maneira, conforme apresentado na Tabela 6.1, adotaram-se pesos iguais para as dimensões econômica (representada por  $\alpha$ ) e ambiental (representado por  $\beta$ ). Isto significa que, neste cenário,  $\alpha$  e  $\beta$  assumiram valores iguais a 0,5. Para tanto, partiu-se da assunção de que, na definição de políticas públicas voltadas para o setor de transportes, o governo daria o mesmo grau de ponderação a ambas as dimensões (tendo em vista as discussões feitas no Capítulo 3).

Além disso, adotou-se a matriz de emissões calculada com base nos fatores de emissão médio encontrados na literatura e o custo de emissão de carbono estabelecido na Seção 5.6. Salienta-se que no cenário referencial, apenas a política de regulação de carbono *carbon tax* é considerada. Isto significa que a restrição que limita o montante de carbono emitido (Restrição 4.15) foi deixada livre. Tendo em vista que os relatórios do PNLIT e do projeto CIL não abordam diretamente as emissões, foi

necessário deixar esta restrição livre para se identificar o volume de carbono emitido no cenário referencial e, a ele, propor reduções.

Adotou-se o valor de  $g_k = 1$ , estando associado ao entendimento de que o CIL é uma estrutura fundamental para o alcance das metas determinadas no planejamento governamental do setor de transporte e, por isso, seria implantada independente do custo. Adicionalmente, não foi imposta nenhuma restrição orçamentária em relação ao montante de investimentos destinados a abertura de CILs (Restrição (4.11)), nem imposição sobre a quantidade máxima de facilidades a serem abertas (Restrição (4.12)).

Como resultado, neste cenário, foram abertos 90 CILs (Figura 6.1), a custo total de R\$ 10,151 bilhões (considerando os custos logísticos e de emissão de CO<sub>2</sub>, tanto do transporte direto, quanto daquele intermediado por uma estrutura de integração). Os custos de transporte e movimentação (diretos e por meio de um CIL) representam 92,53% do custo total, sendo que os gastos com CIL representam a maior parcela (90,84%).

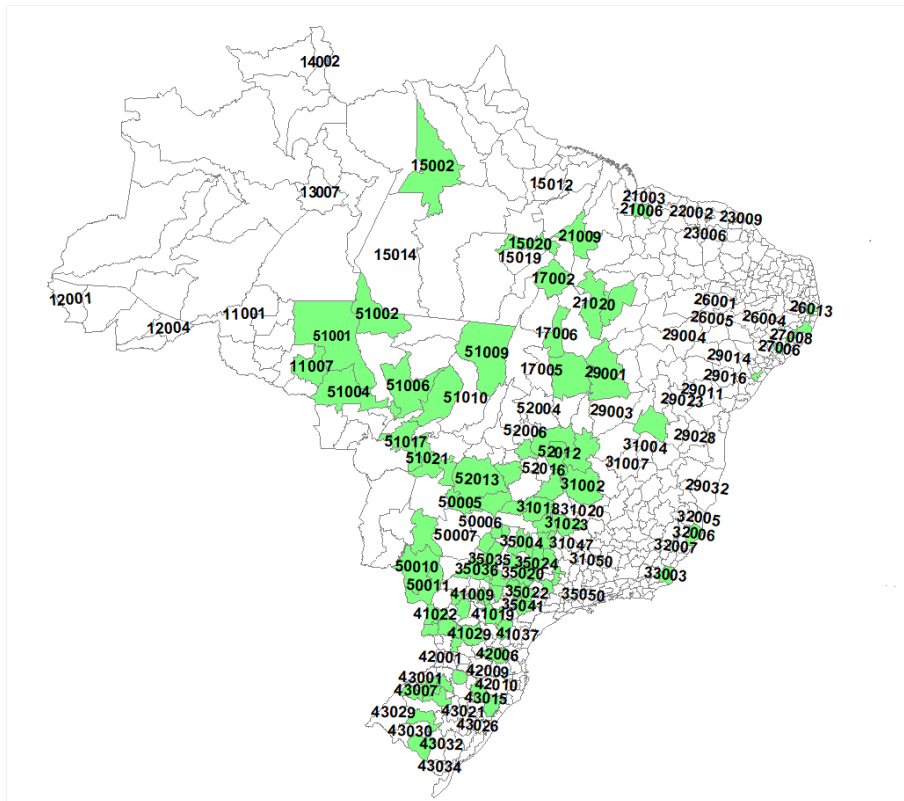


Figura 6.1: CILs habilitados no cenário referencial

Ressalta-se que, na composição do custo total, os dispêndios com o CIL representam uma parcela maior (conforme Figura 6.2) porque, neste cenário, o modelo matemático indicou a abertura de uma grande quantidade de facilidades (quase a metade dos candidatos foram habilitados) visando a redução do custo total da rede.

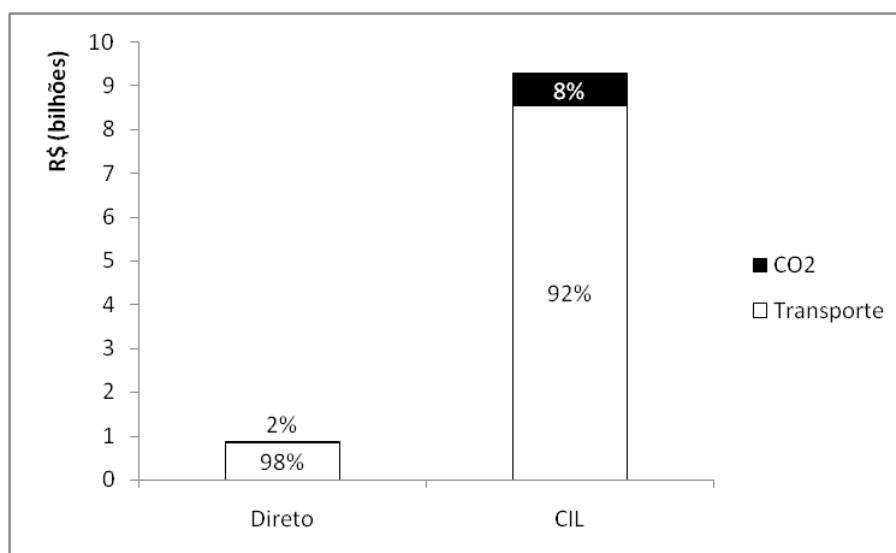


Figura 6.2: Relação entre custo logístico e de CO<sub>2</sub> na composição do custo total

Além de indicar os CILs habilitados, a Tabela 6.2 detalha: (i) os volumes de movimentação em cada estrutura; (ii) os custos logísticos e de emissão de CO<sub>2</sub>, por CIL; e, (iii) os custos totais associados a cada facilidade. De maneira complementar, a Figura 6.3 apresenta a relação entre os custos logísticos e de emissão em cada um dos CILs habilitados.

Tabela 6.2: CILs habilitados no cenário médio com pesos iguais ( $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$ )

Microrregião	UF	Volume (t)	Custo logístico (R\$ x10 <sup>6</sup> )	Custo com CO <sub>2</sub> (R\$ x10 <sup>6</sup> )	Custo total (R\$ x10 <sup>6</sup> )
Alto Teles Pires	MT	11.057.240	719,56	63,46	783,03
Aripuana	MT	4.790.500	353,83	31,22	385,05
Dourados	MS	4.581.780	190,12	10,19	200,31
Gerais de Balsas	MA	3.917.910	326,98	19,82	346,80
Ribeirao Preto	SP	3.725.450	116,46	21,62	138,08
Cuiaba	MT	3.309.890	307,82	22,56	330,39
Sudoeste de Goias	GO	3.229.220	148,38	9,25	157,63
Guanambi	BA	3.105.540	296,67	24,16	320,83
Mata Setentrional Pernambucana	PE	3.024.960	155,36	27,38	182,74
Alto Parnaiba Piauiense	PI	3.019.850	294,90	16,48	311,38
Sao Jose do Rio Preto	SP	2.674.510	98,79	13,08	111,87
Anapolis	GO	2.604.100	234,91	18,94	253,85
Barreiras	BA	2.493.620	135,36	9,89	145,25
Paranatinga	MT	2.422.610	180,88	13,67	194,55
Maringa	PR	2.414.670	124,10	13,29	137,39
Brasilia	DF	2.403.140	203,65	15,76	219,41
Parecis	MT	2.402.000	181,21	12,50	193,71

Tabela 6.2: CILs habilitados no cenário médio com pesos iguais ( $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$ )

Microrregião	UF	Volume (t)	Custo logístico (R\$ x10 <sup>6</sup> )	Custo com CO <sub>2</sub> (R\$ x10 <sup>6</sup> )	Custo total (R\$ x10 <sup>6</sup> )
Arapiraca	AL	2.305.440	115,91	18,21	134,12
Guarapuava	PR	2.219.000	82,98	2,89	85,87
Serrana dos Quilombos	AL	2.183.800	104,32	20,86	125,18
Cascavel	PR	2.173.150	90,96	3,89	94,85
Assis	SP	2.148.870	86,16	8,70	94,86
Sao Joaquim da Barra	SP	2.134.400	67,30	11,12	78,41
Jaboticabal	SP	2.007.500	65,09	10,62	75,71
Mata Meridional Pernambucana	PE	1.949.420	76,90	17,50	94,40
Catanduva	SP	1.665.800	51,88	8,12	60,01
Uberaba	MG	1.664.670	52,08	6,86	58,95
Rondonopolis	MT	1.639.770	92,78	7,82	100,60
Boquim	SE	1.633.170	90,30	9,63	99,93
Jau	SP	1.614.100	49,68	8,80	58,48
Toledo	PR	1.592.870	56,52	2,01	58,53
Canoinhas	SC	1.460.280	59,31	1,32	60,63
Limeira	SP	1.397.870	50,52	7,84	58,37
Piracicaba	SP	1.396.300	47,31	7,89	55,20
Adamantina	SP	1.359.720	59,71	7,72	67,43
Entorno de Brasilia	GO	1.323.360	44,23	3,04	47,27
Cianorte	PR	1.321.920	60,37	6,48	66,85
Araraquara	SP	1.314.110	44,01	6,81	50,82
Araxa	MG	1.261.190	40,57	4,04	44,61
Norte Araguaia	MT	1.239.870	136,72	8,19	144,91
Itapecuru Mirim	MA	1.128.410	130,10	8,80	138,90
Uberlandia	MG	1.112.570	38,09	4,33	42,42
Cornelio Procopio	PR	1.097.870	36,47	2,91	39,38
Pato Branco	PR	1.066.070	40,10	1,58	41,68
Vilhena	RO	1.000.000	89,30	6,82	96,12
Santarem	PA	1.000.000	102,85	6,30	109,15
Maraba	PA	1.000.000	123,41	6,45	129,86
Araguaina	TO	1.000.000	108,18	5,60	113,78
Porto Nacional	TO	1.000.000	97,43	7,00	104,43
Dianopolis	TO	1.000.000	92,31	6,17	98,48
Imperatriz	MA	1.000.000	106,01	5,25	111,27
Unai	MG	1.000.000	39,29	2,67	41,97
Paracatu	MG	1.000.000	62,71	4,81	67,52
Ituiutaba	MG	1.000.000	53,17	3,78	56,95
Linhares	ES	1.000.000	94,21	8,78	102,98

Tabela 6.2: CILs habilitados no cenário médio com pesos iguais ( $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$ )

Microrregião	UF	Volume (t)	Custo logístico (R\$ x10 <sup>6</sup> )	Custo com CO <sub>2</sub> (R\$ x10 <sup>6</sup> )	Custo total (R\$ x10 <sup>6</sup> )
Campos dos Goytacazes	RJ	1.000.000	43,13	5,53	48,66
Jales	SP	1.000.000	50,85	5,41	56,26
Fernandópolis	SP	1.000.000	47,35	4,99	52,34
Ituverava	SP	1.000.000	44,40	5,42	49,82
Andradina	SP	1.000.000	53,16	5,54	58,70
Aracatuba	SP	1.000.000	53,78	6,15	59,93
Lins	SP	1.000.000	44,52	5,38	49,90
Bauru	SP	1.000.000	44,91	6,07	50,99
Avare	SP	1.000.000	47,34	4,95	52,29
Pirassununga	SP	1.000.000	45,27	5,56	50,83
Presidente Prudente	SP	1.000.000	50,23	4,47	54,70
Ourinhos	SP	1.000.000	36,45	5,38	41,82
Itapeva	SP	1.000.000	33,05	0,93	33,99
Campo Mourao	PR	1.000.000	47,46	2,56	50,01
Apucarana	PR	1.000.000	45,42	4,26	49,68
Londrina	PR	1.000.000	38,36	2,61	40,97
Telemaco Borba	PR	1.000.000	31,27	1,23	32,50
Ponta Grossa	PR	1.000.000	32,53	0,59	33,12
Foz do Iguaçu	PR	1.000.000	44,33	2,08	46,40
Erechim	RS	1.000.000	42,14	1,87	44,01
Santo Angelo	RS	1.000.000	40,19	2,62	42,81
Ijuí	RS	1.000.000	34,59	1,71	36,30
Carazinho	RS	1.000.000	35,69	1,37	37,07
Cruz Alta	RS	1.000.000	29,28	1,23	30,52
Vacaria	RS	1.000.000	41,18	1,32	42,50
Santa Maria	RS	1.000.000	40,99	1,99	42,99
Campanha Meridional	RS	1.000.000	56,18	3,47	59,65
Campo Grande	MS	1.000.000	59,54	4,27	63,81
Cassilândia	MS	1.000.000	46,62	3,21	49,83
Iguatemi	MS	1.000.000	40,34	2,83	43,17
Alta Floresta	MT	1.000.000	103,51	5,02	108,53
Alto Araguaia	MT	1.000.000	56,47	4,28	60,75
Vale do Rio dos Bois	GO	1.000.000	42,98	2,84	45,82
Catalão	GO	1.000.000	43,97	3,75	47,72
Quirinópolis	GO	1.000.000	76,06	5,50	81,56
Total		150.588.490	8531,757	741,3255	9273,083

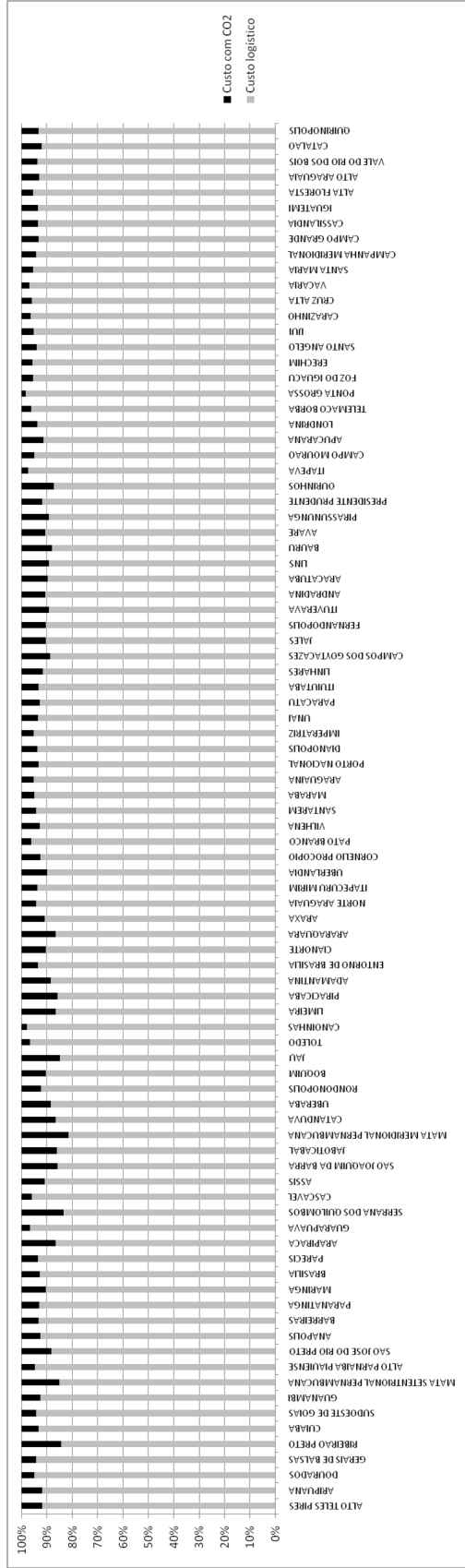


Figura 6.3: Relação entre custo logístico e de CO<sub>2</sub> de cada CIL habilitado

É possível observar que, independente do valor financeiro, o custo logístico representa a maior parcela de dispêndios associados a um CIL: variando de 81,5% em Mata Meridional Pernambucana - PE a 98,2% em Ponta Grossa - PR dos custos totais de cada estrutura. Como reflexo, embora este cenário adote pesos idênticos para os termos econômicos e ambientais, o modelo traz resultados de economia maiores associados aos custos logísticos, em função da diferença de magnitude entre tais valores: o custo com transporte e movimentação é, no mínimo 4,4 vezes maior que o custo com emissão de CO<sub>2</sub> (em Catanduva - SP), chegando a ser 54,8 vezes superior (no CIL habilitado em Foz do Iguaçu - PR).

Quanto aos custos médios da movimentação por CILs, verifica-se que o custo logístico equivale a R\$ 54,78/t, enquanto o de emissão é R\$ 4,59/t (associado a uma emissão média de 0,05 tCO<sub>2</sub>/t por CIL). A Figura 6.4 detalha os valores apresentados na Figura 6.3 para os CILs habilitados para movimentação de, pelo menos, 2 milhões de toneladas. Nela, é possível verificar que o custo total não acompanha, necessariamente o volume movimentado, pois também depende de outros fatores como as conexões de transporte disponíveis.

Assim, um CIL que movimente um maior volume pode ter custos totais mais baixos, a depender da combinação intermodal usada para enviar a carga do CIL ao ponto de destino. Dourados - MS, por exemplo, movimenta 4.581.780 t a um custo de R\$ 200.310.988,26, enquanto Geral das Balsas - MA atrai 3.917.910 t a um custo de R\$ 346.804.025,91). Não obstante, o custo logístico tem um impacto maior que o custo associado à emissão de CO<sub>2</sub> em todos os casos.

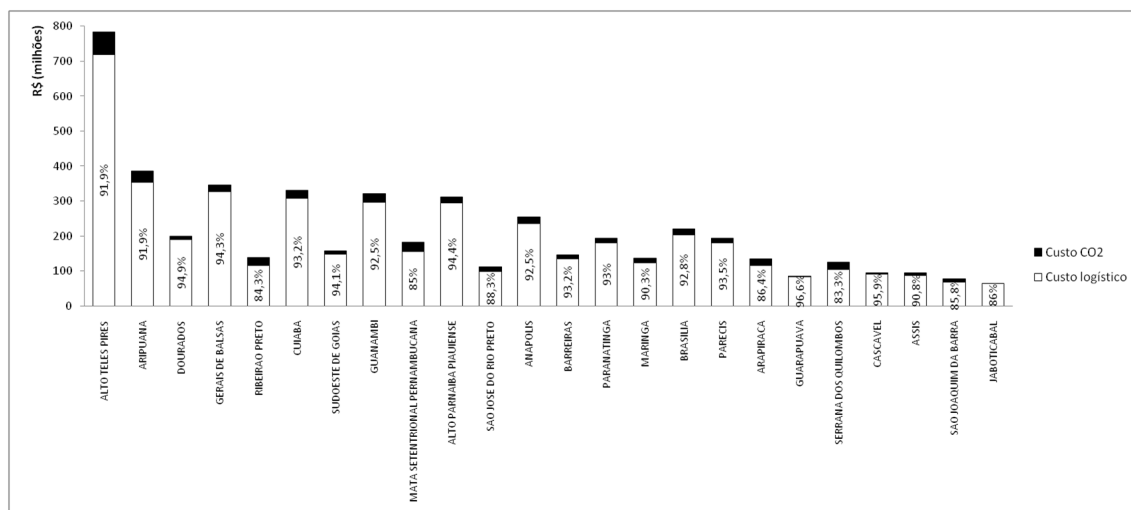


Figura 6.4: Relação entre custo logístico e de CO<sub>2</sub> dos CILs habilitados com, pelo menos, 2 milhões de toneladas

Em relação à distribuição de CILs por região, tem-se a Figura 6.5. Verifica-se que a maior quantidade de CILs foram habilitados na região Sudeste - 31 CILs (com destaque para o estado de São Paulo, com 23 deles), seguida pela Sul (22 facilidades)



e Centro-oeste (20 estruturas). Ressalta-se que, embora uma quantidade menor de CILs tenham sido indicados para abertura na região Centro-oeste, esta concentra o maior volume de carga transportada por meio de facilidades (49.003.480 t *versus* 42.477.060 t na Sudeste e 27.345.830 t na Sul).

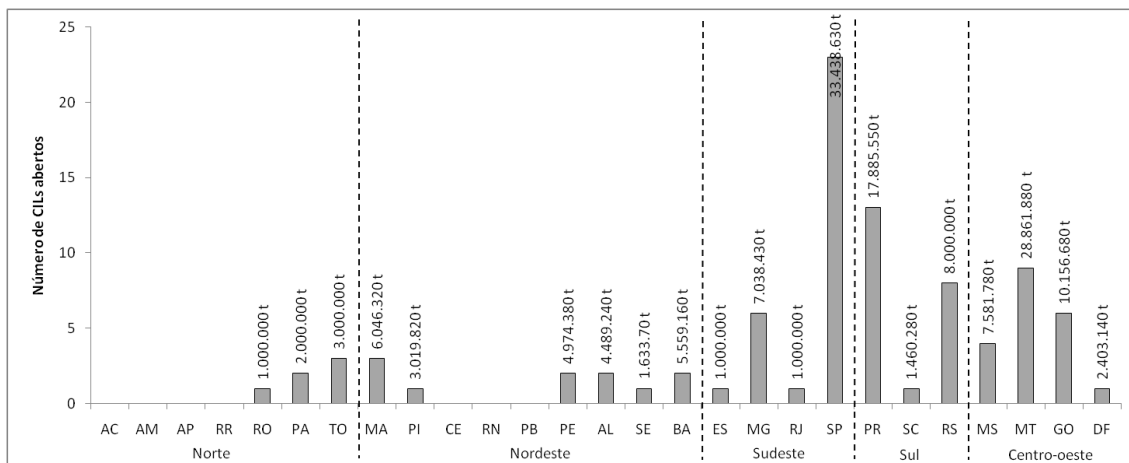


Figura 6.5: CILs habilitados por região (Cenário 01)

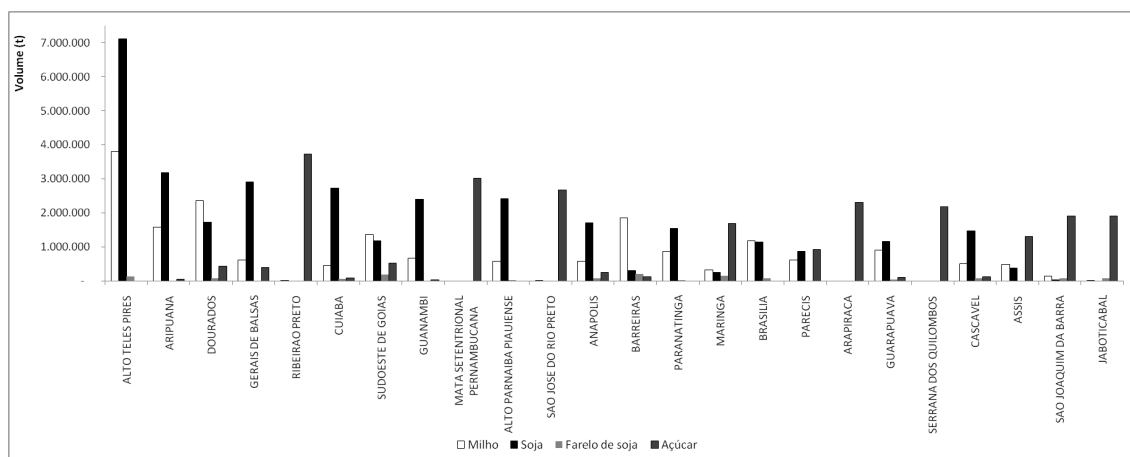
A região com a menor quantidade de CILs indicados para abertura é a Norte, com seis facilidades totalizando 6 mil toneladas. Este resultado está coerente com a determinação dos candidatos à CIL (Figura 5.7), tendo em vista que os principais critérios adotados foram: proximidade das regiões produtoras e disponibilidades de conexões de transporte que possam ser utilizadas para intermodalidade.

Salienta-se que a quantidade de estruturas abertas não está diretamente associada ao volume de movimentação. Por exemplo, no Piauí houve a indicação para abertura de apenas um CIL, para movimentação de 3.019.850 t, enquanto no Tocantins três facilidades seriam abertas para movimentar um total de 3.000.000 t. De maneira análoga, oito estruturas foram indicadas para abertura no Rio Grande do Sul, voltadas para movimentação de 1.000.000 t, cada.

Nota-se, ainda, que os estados de São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e Mato Grosso tiveram o maior número de CILs habilitados: 23, 13, 9 e 8 estruturas, respectivamente. Contudo, as maiores concentrações de carga estão nos estados de São Paulo (33.438.630 t), Mato Grosso (28.861.880 t), Paraná (17.885.550 t) e Goiás (10.156.680 t). Ademais, considerando a movimentação média por CIL, destacam-se os estados de Mato Grosso (3.206.875,56 t/CIL), Piauí (3.019.850 t/CIL), Bahia (2.799.580 t/CIL) e Pernambuco (2.487.190 t/CIL), nesta ordem. São Paulo, o estado com maior volume de movimentação, por sua vez, tem uma atratividade média de 1.453.853,48 t/CIL.

Neste contexto, vale destacar que dos 90 CILs indicados na Tabela 6.2, 51% foram habilitados com a quantidade mínima de 1.000.000 t e 24 estruturas foram abertas com volume de movimentação superior a 2.000.000 t. O CIL com maior volume

de movimentação está localizado em Alto Teles Pires, MT. Dedicado aos produtos milho (34,5%), soja (64,4%) e farelo de soja (1,2%), esta estrutura atraiu 11.057.240 t. Em seguida, têm-se os CILs de Aripuana - MT e Dourados - MS atraindo, respectivamente, 4.790.500 t e 4.581.780 t. A distribuição das cargas predominantes nos CILs habilitados para movimentar mais de 2.000.000 t está indicada na Figura 6.6.



Nota: Optou-se por selecionar os CILs com mais de 2.000.000 t, tendo em vista que ao aplicar a Regra de Pareto (80 - 20), seria necessário incluir CILs com 1.000.000 t movimentadas para a composição dos 80% (limite mínimo para abertura). Ressalta-se, contudo, que os CILs habilitados com mais de 2.000.000 t movimentadas representam 69,45% da movimentação total de carga por meio deste tipo de facilidade.

Figura 6.6: CILs habilitados com mais de 2 milhões de toneladas e respectivos produtos movimentados

Analisando de maneira conjunta a Tabela 6.2 e a Figura 6.6, nota-se que a região com maior número de CILs habilitados dentre aqueles com maior movimentação é a Centro-oeste (9 estruturas), seguida pela Nordeste (7 facilidades) e pela Sudeste (com 5 facilidades). Nenhum CIL da região Norte está presente na Figura 6.6. O volume de movimentação, neste caso, segue a mesma ordem: centro-oeste, nordeste, sudeste e sul, somando 76.349.150 t. Ainda, a soja e o açúcar são os produtos mais movimentados nas principais estruturas (32.501.270 t e 23.705.760 t, respectivamente).

Voltando à atenção para todas as estruturas habilitadas (Tabela 6.2), verifica-se que 57,85% da demanda total por milho, 67,21% da demanda total por soja, 87,27% da demanda total por farelo de soja e 95,1% da demanda total por açúcar são atendidas por intermédio de CILs (Figura 6.7). Isso representa um total de 150.588.490

t atraídas por este tipo de facilidade, cuja divisão por cargas movimentadas é apresentada na Figura 6.8.

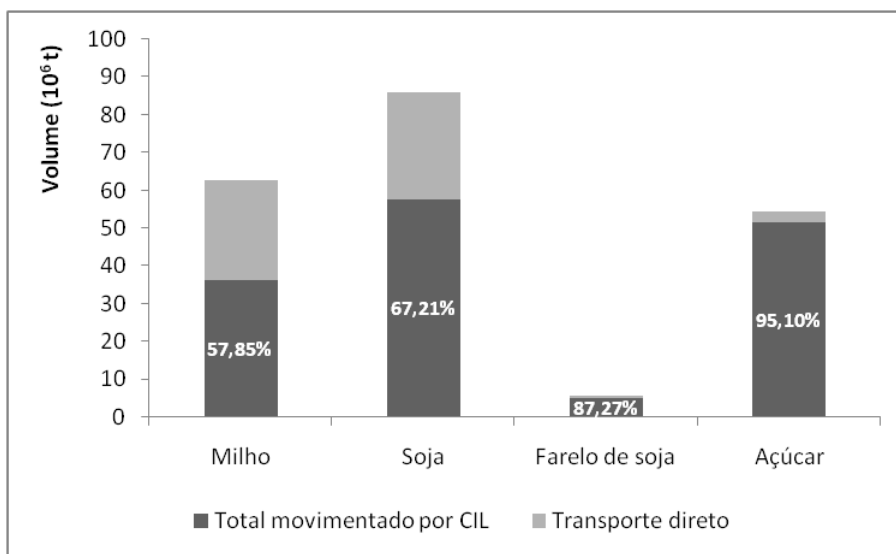


Figura 6.7: Distribuição das cargas movimentadas diretamente e por meio de CILs

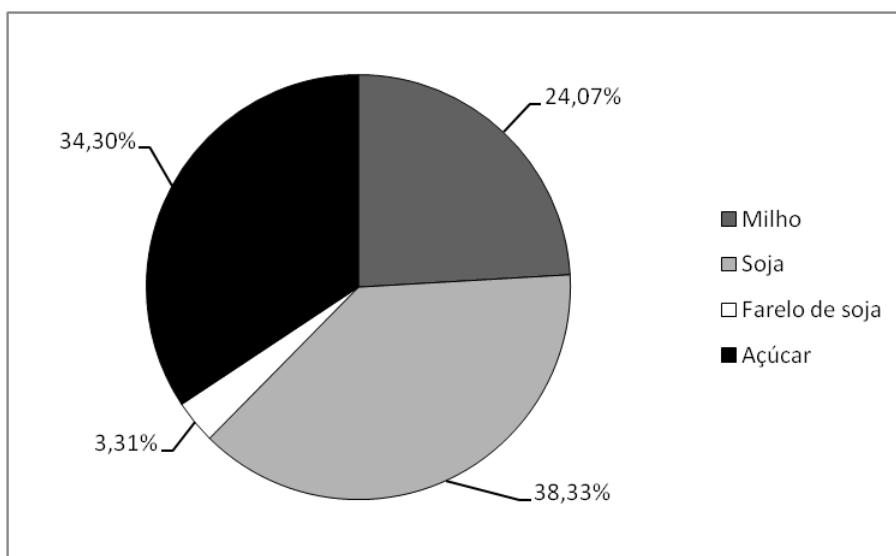


Figura 6.8: Distribuição das cargas movimentadas por meio de CILs

Percebe-se que, embora farelo e açúcar sejam os produtos com a maior parcela da demanda total movimentada por meio de CILs, eles não representam o maior volume de movimentação das estruturas habilitadas. Isso pode ser explicado pelo fato da produção de soja ser maior que destes produtos (conforme Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5; e Tabelas D.1, D.2, D.3 e D.4 apresentadas no Apêndice D). A Tabela 6.3 apresenta a distribuição de cargas por estrutura habilitada.

Tabela 6.3: Distribuição das cargas movimentadas por cada CIL habilitado

Posição	Microrregião	UF	Milho (t)	%	Soja (t)	%	Farelo (t)	%	Açúcar (t)	%	Total (t)
1º	Alto Teles Pires	MT	3.809.840	34,5	7.116.740	64,4	130.660	1,2	-	0,0	11.057.240
2º	Aripuana	MT	1.571.020	32,8	3.173.720	66,3	-	0,0	45.760	1,0	4.790.500
3º	Dourados	MS	2.361.360	51,5	1.722.420	37,6	72.410	1,6	425.590	9,3	4.581.780
4º	Gerais de Balsas	MA	615.480	15,7	2.916.560	74,4	-	0,0	385.870	9,8	3.917.910
5º	Ribeirao Preto	SP	3.020	0,1	-	0,0	-	0,0	3.722.430	99,9	3.725.450
6º	Cuiaba	MT	444.820	13,4	2.722.660	82,3	59.560	1,8	82.850	2,5	3.309.890
7º	Sudoeste de Goias	GO	1.358.960	42,1	1.174.260	36,4	177.310	5,5	518.690	16,1	3.229.220
8º	Guanambi	BA	672.770	21,7	2.395.800	77,1	-	0,0	36.970	1,2	3.105.540
9º	Mata Setentrional Pernambucana	PE	-	0,0	-	0,0	-	0,0	3.024.960	100,0	3.024.960
10º	Alto Parnaiba Piauiense	PI	572.610	19,0	2.418.620	80,1	28.620	0,9	-	0,0	3.019.850
11º	Sao Jose do Rio Preto	SP	9.250	0,3	-	0,0	-	0,0	2.665.260	99,7	2.674.510
12º	Anapolis	GO	575.520	22,1	1.699.660	65,3	83.730	3,2	245.190	9,4	2.604.100
13º	Barreiras	BA	1.853.850	74,3	306.320	12,3	207.440	8,3	126.010	5,1	2.493.620
14º	Paranatinga	MT	858.970	35,5	1.549.690	64,0	13.950	0,6	-	0,0	2.422.610
15º	Maringa	PR	322.660	13,4	255.570	10,6	150.460	6,2	1.685.980	69,8	2.414.670
16º	Brasilia	DF	1.184.730	49,3	1.147.980	47,8	70.430	2,9	-	0,0	2.403.140
17º	Parecis	MT	609.530	25,4	874.810	36,4	-	0,0	917.660	38,2	2.402.000
18º	Arapiraca	AL	-	0,0	-	0,0	-	0,0	2.305.440	100,0	2.305.440
19º	Guarapuava	PR	912.900	41,1	1.156.780	52,1	40.090	1,8	109.230	4,9	2.219.000
20º	Serrana dos Quilombos	AL	-	0,0	-	0,0	-	0,0	2.183.800	100,0	2.183.800
21º	Cascavel	PR	507.740	23,4	1.476.850	68,0	76.250	3,5	112.310	5,2	2.173.150
22º	Assis	SP	480.160	22,3	367.290	17,1	-	0,0	1.301.420	60,6	2.148.870
23º	Sao Joaquim da Barra	SP	131.130	6,1	25.540	1,2	76.060	3,6	1.901.670	89,1	2.134.400
24º	Jaboticabal	SP	19.960	1,0	-	0,0	78.870	3,9	1.908.670	95,1	2.007.500

Tabela 6.3: Distribuição das cargas movimentadas por cada CIL habilitado

Posição	Microrregião	UF	Milho (t)	%	Soja (t)	%	Farelo (t)	%	Açúcar (t)	%	Total (t)
25º	Mata Meridional	PE	-	0,0	-	0,0	-	0,0	1.949.420	100,0	1.949.420
26º	Catanduva	SP	-	0,0	-	0,0	-	0,0	1.665.800	100,0	1.665.800
27º	Uberaba	MG	337.140	20,3	244.320	14,7	-	0,0	1.083.210	65,1	1.664.670
28º	Rondonópolis	MT	625.980	38,2	512.720	31,3	408.850	24,9	92.220	5,6	1.639.770
29º	Boquim	SE	1.567.810	96,0	-	0,0	-	0,0	65.360	4,0	1.633.170
30º	Jau	SP	-	0,0	-	0,0	-	0,0	1.614.100	100,0	1.614.100
31º	Toledo	PR	433.140	27,2	1.135.140	71,3	24.590	1,5	-	0,0	1.592.870
32º	Canoinhas	SC	546.490	37,4	544.860	37,3	368.930	25,3	-	0,0	1.460.280
33º	Limeira	SP	21.940	1,6	-	0,0	-	0,0	1.375.930	98,4	1.397.870
34º	Piracicaba	SP	2.910	0,2	-	0,0	-	0,0	1.393.390	99,8	1.396.300
35º	Adamantina	SP	-	0,0	-	0,0	90.360	6,6	1.269.360	93,4	1.359.720
36º	Entorno de Brasília	GO	461.890	34,9	849.050	64,2	9.340	0,7	3.080	0,2	1.323.360
37º	Cianorte	PR	132.880	10,1	376.070	28,4	-	0,0	812.970	61,5	1.321.920
38º	Araraquara	SP	8.160	0,6	-	0,0	-	0,0	1.305.950	99,4	1.314.110
39º	Araxá	MG	649.100	51,5	275.800	21,9	-	0,0	336.290	26,7	1.261.190
40º	Norte Araguaia	MT	217.010	17,5	1.014.250	81,8	-	0,0	8.610	0,7	1.239.870
41º	Itapecuru Mirim	MA	587.280	52,0	519.270	46,0	-	0,0	21.860	1,9	1.128.410
42º	Uberlândia	MG	93.910	8,4	-	0,0	249.010	22,4	769.650	69,2	1.112.570
43º	Cornélio Procopio	PR	343.910	31,3	489.120	44,6	-	0,0	264.840	24,1	1.097.870
44º	Pato Branco	PR	217.900	20,4	788.450	74,0	59.720	5,6	-	0,0	1.066.070
45º	Vilhena	RO	519.480	51,9	480.520	48,1	-	0,0	-	0,0	1.000.000
46º	Santarem	PA	377.780	37,8	497.860	49,8	124.360	12,4	-	0,0	1.000.000
46º	Marabá	PA	335.160	33,5	621.750	62,2	43.090	4,3	-	0,0	1.000.000
46º	Araguaina	TO	179.900	18,0	820.100	82,0	-	0,0	-	0,0	1.000.000
46º	Porto Nacional	TO	387.730	38,8	604.980	60,5	7.290	0,7	-	0,0	1.000.000

Tabela 6.3: Distribuição das cargas movimentadas por cada CIL habilitado

Posição	Microrregião	UF	Milho (t)	%	Soja (t)	%	Farelo (t)	%	Açúcar (t)	%	Total (t)
46º	Dianópolis	TO	347.090	34,7	652.910	65,3	-	0,0	-	0,0	1.000.000
46º	Imperatriz	MA	447.540	44,8	511.620	51,2	-	0,0	40.840	4,1	1.000.000
46º	Unai	MG	402.150	40,2	597.850	59,8	-	0,0	-	0,0	1.000.000
46º	Paracatu	MG	567.870	56,8	295.130	29,5	-	0,0	137.000	13,7	1.000.000
46º	Ituiutaba	MG	218.790	21,9	189.700	19,0	54.500	5,5	537.010	53,7	1.000.000
46º	Linhares	ES	441.670	44,2	-	0,0	-	0,0	558.330	55,8	1.000.000
46º	Campos dos Goytacazes	RJ	78.990	7,9	-	0,0	-	0,0	921.010	46º	1.000.000
46º	Jales	SP	7.640	0,8	-	0,0	-	0,0	992.360	46º	1.000.000
46º	Fernandópolis	SP	37.710	3,8	-	0,0	-	0,0	962.290	96,2	1.000.000
46º	Ituverava	SP	174.710	17,5	27.000	2,7	-	0,0	798.290	79,8	1.000.000
46º	Andradina	SP	26.230	2,6	-	0,0	47.400	4,7	926.370	92,6	1.000.000
46º	Aracatuba	SP	14.860	1,5	-	0,0	-	0,0	985.140	98,5	1.000.000
46º	Lins	SP	15.860	1,6	-	0,0	-	0,0	984.140	98,4	1.000.000
46º	Bauru	SP	19.240	1,9	-	0,0	-	0,0	980.760	98,1	1.000.000
46º	Avare	SP	138.140	13,8	207.800	20,8	-	0,0	654.060	65,4	1.000.000
46º	Pirassununga	SP	39.100	3,9	-	0,0	-	0,0	960.900	96,1	1.000.000
46º	Presidente Prudente	SP	161.910	16,2	96.210	9,6	37.040	3,7	704.840	70,5	1.000.000
46º	Ourinhos	SP	123.090	12,3	70.490	7,0	-	0,0	806.420	80,6	1.000.000
46º	Itapeva	SP	686.960	68,7	313.040	31,3	-	0,0	-	0,0	1.000.000
46º	Campo Mourao	PR	482.320	48,2	383.720	38,4	67.910	6,8	66.050	6,6	1.000.000
46º	Apucarana	PR	146.880	14,7	403.130	40,3	-	0,0	449.990	45,0	1.000.000
46º	Londrina	PR	245.600	24,6	394.150	39,4	169.340	16,9	190.910	19,1	1.000.000
46º	Telemaco Borba	PR	360.030	36,0	599.010	59,9	-	0,0	40.960	4,1	1.000.000
46º	Ponta Grossa	PR	384.090	38,4	166.480	16,6	449.430	44,9	-	0,0	1.000.000
46º	Foz do Iguaçu	PR	262.440	26,2	727.950	72,8	9.610	1,0	-	0,0	1.000.000

Tabela 6.3: Distribuição das cargas movimentadas por cada CIL habilitado

Posição	Microrregião	UF	Milho (t)	%	Soja (t)	%	Farelo (t)	%	Açúcar (t)	%	Total (t)
46º	Erechim	RS	215.440	21,5	762.450	76,2	22.110	2,2	-	0,0	1.000.000
46º	Santo Angelo	RS	134.650	13,5	802.250	80,2	63.100	6,3	-	0,0	1.000.000
46º	Ijuí	RS	138.920	13,9	840.040	84,0	21.040	2,1	-	0,0	1.000.000
46º	Carazinho	RS	163.470	16,3	651.180	65,1	185.350	18,5	-	0,0	1.000.000
46º	Cruz Alta	RS	121.420	12,1	853.050	85,3	25.530	2,6	-	0,0	1.000.000
46º	Vacaria	RS	397.410	39,7	404.140	40,4	198.450	19,8	-	0,0	1.000.000
46º	Santa Maria	RS	86.250	8,6	788.000	78,8	125.750	12,6	-	0,0	1.000.000
46º	Campanha Meridional	RS	171.350	17,1	354.300	35,4	474.350	47,4	-	0,0	1.000.000
46º	Campo Grande	MS	369.490	36,9	330.570	33,1	71.810	7,2	228.130	22,8	1.000.000
46º	Cassilandia	MS	320.800	32,1	595.320	59,5	-	0,0	83.880	8,4	1.000.000
46º	Iguatemi	MS	198.490	19,8	518.690	51,9	-	0,0	282.820	28,3	1.000.000
46º	Alta Floresta	MT	177.580	17,8	822.420	82,2	-	0,0	-	0,0	1.000.000
46º	Alto Araguaia	MT	316.730	31,7	395.870	39,6	228.020	22,8	59.380	5,9	1.000.000
46º	Vale do Rio dos Bois	GO	280.360	28,0	455.610	45,6	-	0,0	264.030	26,4	1.000.000
46º	Catalao	GO	389.520	39,0	539.580	54,0	36.680	3,7	34.220	3,4	1.000.000
46º	Quirinopolis	GO	5.520	0,6	692.950	69,3	40.530	4,1	261.000	26,1	1.000.000
	Total		36.242.090	24,1	57.718.140	38,3	4.979.330	3,3	51.648.930	34,3	150.588.490

Nota-se que milho é transportado por meio de 83 diferentes CILs, enquanto a soja e o açúcar estão presentes em 64 e 63 estruturas, respectivamente. Já o farelo foi movimentado em 43 facilidades. Assinala-se que o açúcar é o único produto com CILs habilitados exclusivamente para sua movimentação (o que pode ser explicado pela sua matriz de produção, geograficamente dispersa de maneira diferente dos demais produtos). Ainda, 18 movimentam todos os tipos de carga, sendo que 10 deles concentram mais de 1.000.000 t.

Entre os 24 CILs que movimentam mais de 2.000.000 t, os dois CILs com maior movimentação (10,5% do total) têm predomínio na atração de soja. Há de se ressaltar que o milho é a carga predominante em quatro destes 24 CILs (3º, 7º, 13º e 16º colocados quanto à movimentação), enquanto a soja domina dez CILs (1ª, 2ª, 4ª, 6ª, 8ª, 10ª, 12ª, 14ª, 19ª e 21ª posições). O farelo não tem destaque em nenhuma facilidade, o que se justifica pelo seu volume produzido (5.705.500 t frente a 85.881.610 t de soja, por exemplo - conforme Tabelas D.2 e D.1 do Apêndice D).

O açúcar, por sua vez, é predominante em 10 estruturas (5º, 9º, 11º, 15º, 17º, 18º, 20º, 22º, 23º e 24º colocados), sendo que: três delas movimentam exclusivamente este produto e duas concentram mais que 99,5% deste. Ressalta-se que os CILs habilitados no estado de SP têm predomínio na atração por açúcar.

De maneira geral, os CILs habilitados no Norte tem maior atratividade para a soja (entre 48,1% e 82% de volume nas facilidades abertas). Embora Vilhena - RO concentre maior volume de milho (51,9%), a soja representa 48,1% da movimentação total. Não há atratividade de açúcar em nenhuma facilidade. Destaca-se, ainda, que todas as estruturas desta região foram habilitadas com a quantidade mínima de 1.000.000 t.

Os CILs da região Nordeste, por sua vez, têm uma distribuição menos uniforme: três facilidades se destacam no transporte de milho (de 74,3% a 96% do volume total), quatro no transporte de soja (51,2% a 80,1%) e quatro são dedicadas ao açúcar (100%). O farelo é, praticamente, irrelevante para as estruturas desta região, estando presente em apenas duas, aos percentuais de 0,9% e 8,3% (ambas movimentando mais de 2.400.000 t). Ressalta-se que apenas um CIL foi habilitado com a quantidade mínima de 1.000.000 t (em Imperatriz - MA) e que as quatro facilidades voltadas para o açúcar transportam exclusivamente este produto.

As estruturas abertas na região Sudeste, em sua maioria, são voltadas predominantemente para o transporte de açúcar. Este produto domina 27 dos 31 CILs habilitados, sendo exclusivo em dois e tendo volume de movimentação maior que 92% (porém movimentando outros produtos) em 16 CILs. As outras quatro estruturas atraem maiores volumes de milho. Destaca-se que o açúcar só não está presente em duas das 31 facilidades abertas nesta região.

Em relação às estruturas da região Sul, há predominância no transporte de soja



em 15 das 22 estruturas abertas (com percentual variando entre 34,9% e 84%). Há, ainda, equilíbrio entre o transporte de milho (37,4%) e soja (37,3%) no CIL de Canoinhas - SC. O açúcar, por sua vez, é predominante em três estruturas. Destaca-se que, nesta região, dois CILs têm o farelo de soja como o produto mais movimentado: 44,9% em Ponta Grossa - RS e 47,4% em Campanha Meridional - RS. Contudo, ambos foram habilitados com o volume mínimo de 1.000.000 t.

A região Centro-oeste tem comportamento similar à Sul, com 14 estruturas atraindo maior volume de soja (variando entre 39,6% e 82,3%). Contudo, a segunda carga mais relevante é o milho, com predomínio em cinco CILs (percentuais variando de 36,9% e 51,5%). Há, ainda, uma facilidade com certo equilíbrio entre o volume movimentado de açúcar (38,2%) e de soja (36,4%). O farelo não se destaca em nenhuma facilidade, alcançando o percentual máximo de 24,9%.

Por fim, é válido retomar a discussão sobre as emissões. Embora a magnitude dos custos logísticos seja maior que os custos de emissão e, portanto, mesmo atribuindo pesos iguais aos elementos da função objetivo, tenham maior influência na localização das facilidades, é possível avaliar o quanto o uso dos CILs proporcionou redução das emissões (auxiliando, ainda que indiretamente, no alcance dos objetivos dos acordos internacionais de redução da pegada de carbono).

Verifica-se que foram emitidas 8.155.240,19 t de carbono (97,7% a partir dos CILs, que concentraram 72,2% da movimentação total entre os pares O/Ds). No entanto, a economia de R\$ 175,567 bilhões indica que 1,887 bilhões de t deixaram de ser emitidas, a partir da configuração ótima indicada neste cenário. Em outras palavras, o uso da intermodalidade proporcionaria 1,89 bilhões de emissões evitadas (que poderiam ser comercializadas, quando o mercado de carbono estiver estabelecido no país).

Compreendendo o comportamento atual da rede no que diz respeito à emissões, é possível definir os parâmetros para avaliação de políticas de regulação de carbono mais restritivas (com valores maiores de taxa à emissão e/ou com imposição de limites de emissão para o setor). Enfatiza-se, no entanto, que os resultados obtidos nesta seção (e nas que se seguem) estão limitadas às configurações (pressupostos e parâmetros) estabelecidas nos Capítulos 3 e 5.

Assim, uma vez apresentados os resultados referentes ao cenário referencial, a Seção 6.1.2 apresenta os resultados da análise dos cenários otimista e pessimista, em que se aplicaram as taxas de emissão mínima e máxima encontradas na literatura.

### **6.1.2 Aplicação: Cenários pessimista e otimista**

Sabe-se que avaliações baseadas em valores médios, podem conduzir a decisões não acuradas, tendo em vista que os parâmetros e as variáveis podem ter compor-

tamentos probabilísticos ou com grande dispersão ao redor da média (Guimarães, Leal Jr e Silva, 2018). No âmbito do planejamento estratégico, usualmente, são estabelecidos cenários otimistas e pessimistas para mapeamento do comportamento do sistema, em função de variações em um ou mais parâmetros<sup>1</sup>.

Assim, esta seção se dedica a avaliar o comportamento da rede considerando alterações nas matrizes de emissão de carbono. Para tanto, foram estabelecidos dois cenários: pessimista (com a matriz formulada a partir da adoção dos fatores de emissão máximos encontrados na literatura - Tabela 5.1) e otimista (com a matriz baseada nos fatores de emissão mínimos encontrados na literatura). Os demais parâmetros foram mantidos iguais aos do cenário referencial, como pôde ser observado na Tabela 6.1. A ideia, portanto, é avaliar se haveria alteração nas regiões ótimas indicadas para abertura, caso houvesse modificação nos fatores de emissão aplicados.

No que diz respeito aos resultados, nos dois cenários foram habilitadas 90 CILs (valor igual ao do cenário referencial). Embora as regiões em que tais estruturas foram habilitadas sejam as mesmas, elas variam a “posição” em relação à quantidade de cargas movimentadas. Foram portanto, habilitados CILs nas mesmas regiões indicadas na Figura 6.1 da Seção 6.1.1, mas os volumes movimentados por cada facilidade divergem de um cenário para o outro.

Não obstante, a variação entre as quantidades movimentadas por CILs nesses três cenários é muito semelhante, não chegando a 0,05%. O mesmo acontece com a distribuição das cargas movimentadas por cada facilidade, como pode ser observado na Figura 6.9.

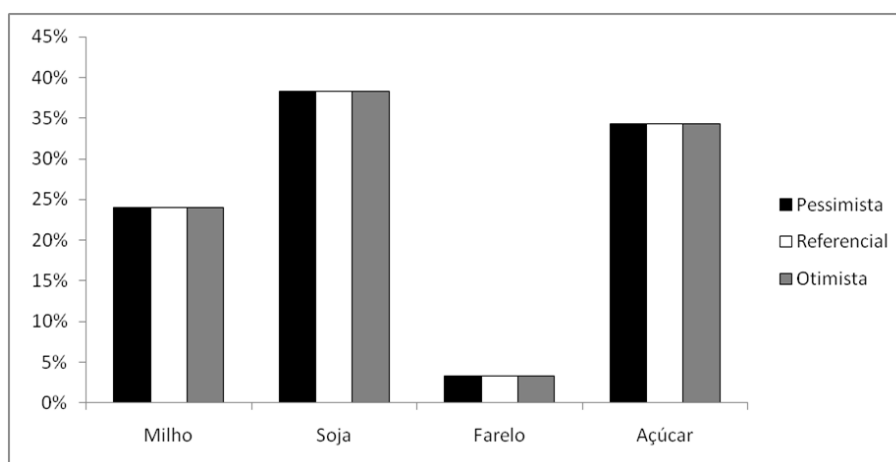


Figura 6.9: Distribuição das cargas movimentadas diretamente e por meio de CILs

<sup>1</sup>A aplicação de análise de cenários no âmbito do planejamento estratégico empresarial pode ser vista em Faller e Almeida (2014); enquanto no âmbito governamental, o portal do Ministério da Infraestrutura dedica uma matéria à importância deste tipo análise no processo de planejamento (disponível em: <http://portaldaestrategia.infraestrutura.gov.br/ultimas-noticias/373-a-analise-de-cenarios-e-o-planejamento-estrategico.html>)

Ressalta-se que nos cenários otimista e médio foram habilitadas 46 estruturas para movimentar 1.000.000 t, enquanto no pessimista foram abertas 45 destas. Quanto aos custos, observa-se uma pequena variação em relação ao cenário referencial. Os custos totais alcançados no cenário pessimista são 4,4% superiores ao referencial, enquanto o cenário otimista prevê uma redução de 1,6% nos custos. No entanto, nota-se que a participação dos CILs em relação ao custo total se mantém, praticamente, inalterada (conforme a Figura 6.10).

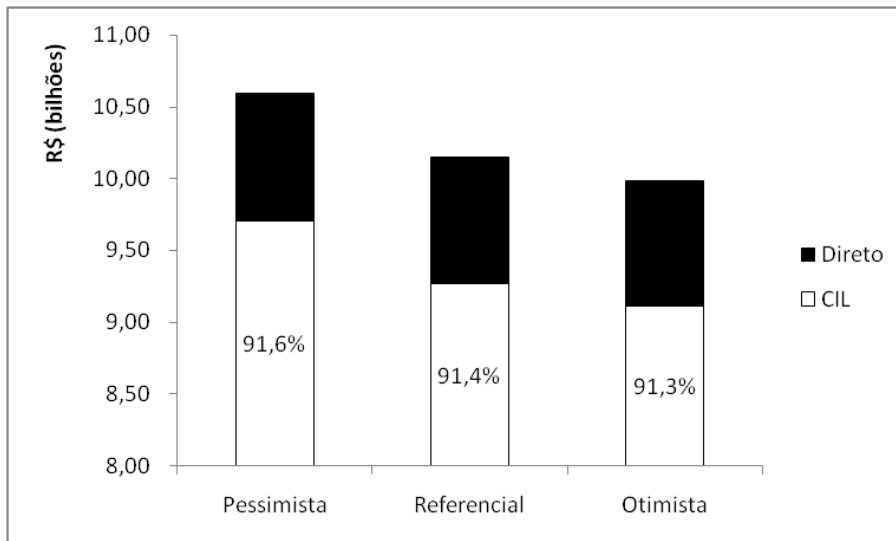


Figura 6.10: Distribuição dos custos totais nos cenários pessimista, referencial e otimista

No que concerne à participação dos custos logísticos e de CO<sub>2</sub> na composição do custo total (tanto no transporte direto, quanto por meio de um CIL), observa-se uma pequena alteração em relação ao cenário referencial (Figura 6.11).

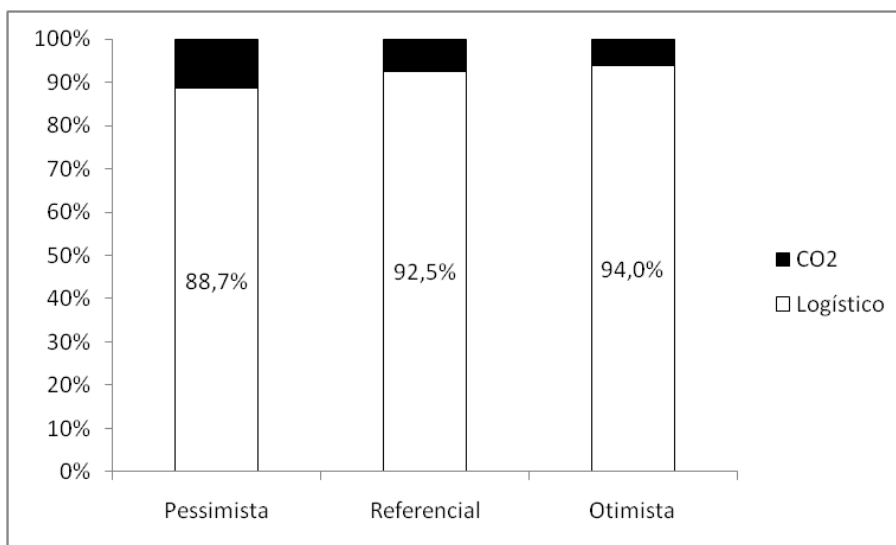


Figura 6.11: Relação entre o custo logístico e de emissão nos cenários pessimista, referencial e otimista

No cenário pessimista, os custos com a emissão chegam a 11,3%; enquanto, no otimista, representam apenas 6% dos custos totais. Essa alteração poderia ser explicada pela mudança na composição de cargas atraídas pelos CILs habilitados em cada cenário.

Verifica-se, portanto, que a análise de cenários mostrou pouca sensibilidade aos resultados. Isto tem três explicações complementares: (i) o modelo matemático é altamente dependente dos parâmetros de entrada; (ii) foram variados apenas os parâmetros associados aos fatores de emissão (os quais estão próximos da média); (iii) o custo logístico é significativamente maior que o de emissão, o que acaba impactando no resultado, mesmo quando se adotam pesos iguais aos dois termos (econômico e ambiental).

Justifica-se, aqui, a opção por variar apenas os fatores de emissão. Como os modelos tradicionais tem um enfoque nos fatores econômicos (como apresentado nas Seções 2.1 e 3.1), optou-se por avaliar a sensibilidade do modelo em função dos impactos ambientais (aqui medido em função das emissões de carbono). Entretanto, diante deste resultado, foi formulado um novo cenário visando avaliar o impacto das alterações no custo da emissão, de maneira a considerar uma política *carbon tax* mais restritiva. Adicionalmente, foi avaliado também o impacto de uma política *carbon cap*, pela adoção da Restrição (4.15).

### 6.1.3 Aplicação: Análise de sensibilidade - variação dos pesos de $\alpha$ e $\beta$

Esta subseção se dedica à análise de sensibilidade do modelo matemático proposto em relação à variação dos pesos adotados para os termos econômico e ambiental que compõem a Função Objetivo (4.16), atendendo ao objetivo específico (v) estabelecido no Capítulo 1.

Assim, além de compreender o comportamento da rede em relação à alterações nos fatores de emissão adotados para determinar as matrizes de carbono (subseção 6.1.2), a análise de sensibilidade permite avaliar o comportamento da rede mediante diferentes políticas que deem mais (ou menos) ênfase à dimensão ambiental. Para tanto, com exceção da alteração dos pesos de  $\alpha$  e  $\beta$ , foram mantidos os demais parâmetros adotados no cenário referencial. A Tabela 6.4 consolida os principais resultados encontrados com a variação dos pesos mencionados.

Nesta tese, convencionou-se chamar o caso  $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$  de cenário econômico, uma vez que a indicação das regiões ótimas leva em consideração apenas o custo logístico (sendo atribuído peso zero à dimensão ambiental). De maneira análoga, o caso  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$  é chamado de cenário ambiental, pois apenas o custo com emissão de carbono é considerado na definição das localizações ótimas. Ressalta-se

que os pesos são complementares, portanto, ao adotar  $\alpha = 0,3$ , necessariamente,  $\beta$  deve assumir o valor de 0,7.

Tabela 6.4: Variação dos resultados em função dos pesos adotados na Função Objetivo

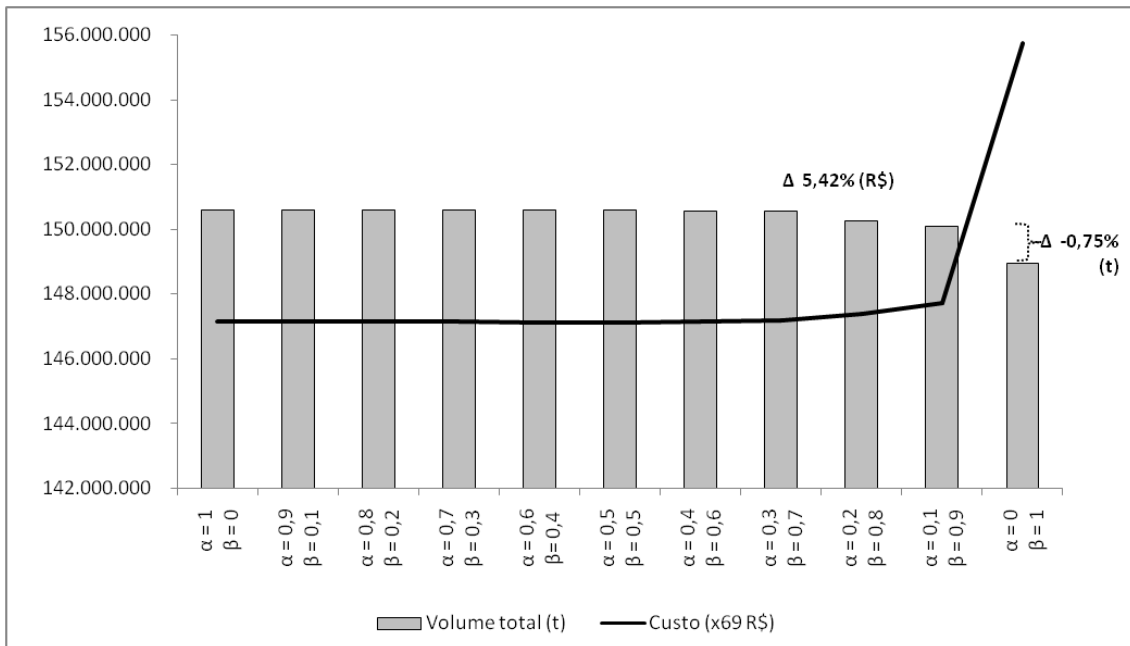
$\alpha$	$\beta$	CILs	Logístico (x10 <sup>9</sup> R\$)	$\Delta_1$ (%)	CO <sub>2</sub> (x10 <sup>6</sup> R\$)	$\Delta_2$ (%)	Total (x10 <sup>9</sup> R\$)	$\Delta_3$ (%)
1	0	90	9,390836	-0,017	762,896431	0,566	10,153732	0,026
0,9	0,1	90	9,390849	-0,017	762,769031	0,550	10,153618	0,025
0,8	0,2	91	9,391098	-0,015	761,675979	0,405	10,152774	0,017
0,7	0,3	91	9,391181	-0,014	761,429308	0,373	10,152610	0,015
0,6	0,4	90	9,392206	-0,003	758,930386	0,043	10,151136	0,001
0,5	0,5	90	9,392476	0,000	758,600442	0,000	10,151077	0,000
0,4	0,6	91	9,396781	0,046	755,545401	-0,403	10,152327	0,012
0,3	0,7	91	9,400519	0,086	753,867946	-0,624	10,154386	0,033
0,2	0,8	91	9,422885	0,324	746,773200	-1,559	10,169658	0,183
0,1	0,9	90	9,450737	0,620	742,270629	-2,153	10,193007	0,413
0	1	82	10,015450	6,633	730,126664	-3,753	10,745576	5,857

Nota:  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  e  $\Delta_3$  indicam, respectivamente, a variação percentual dos custos logístico, de emissão e total em relação ao cenário referencial ( $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$ ). A distribuição percentual dos custos logísticos e de emissão em relação ao custo total pode ser vista ao longo deste capítulo.

Observa-se que, com exceção do caso  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ , a quantidade de CILs abertos oscila entre 90 e 91 estruturas. A variação do volume de cargas atraídas pelas estruturas é pequena (1,09% entre os valores máximo e mínimo), movimentando de 148.956.990 t ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ , em que a menor quantidade de CILs é habilitada) a 150.600.970 t ( $\alpha = 0,8$  e  $\beta = 0,2$ ;  $\alpha = 0,7$  e  $\beta = 0,3$ ;  $\alpha = 0,6$  e  $\beta = 0,4$ ).

A relação entre o volume movimentado e os custos totais em cada caso é apresentada na Figura 6.12, evidenciando certa estabilidade entre os volumes atraídos e os respectivos custos totais em cada cenário. Apenas o  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$  destoa dos demais, mas, ainda assim, sua variação para o cenário anterior ( $\alpha = 0,1$  e  $\beta = 0,9$ ) é de -0,75% do volume e +5,42% do custo total.

Comparando os casos extremos (prioridade à dimensão econômica -  $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$  - e à dimensão ambiental -  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ) ao referencial (pesos iguais a ambas dimensões), verifica-se que a indicação das áreas para localização de facilidades é substancialmente a mesma. O CIL que ocupa a primeira colocação nos três cenários é Alto Teles Pires - MT, variando ligeiramente o volume atraído (7,34% do volume total movimentado por estruturas de integração nos casos  $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$  e  $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$ ; e 6,45% do total em  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ). Além disso, os seis CILs mais relevantes são coincidentes, nos cenários  $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$  e  $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$ .



Nota: Para que fosse possível visualizar as duas informações no mesmo gráfico, os valores de custo foram divididos por 69. Dessa forma, o eixo y é adimensional, podendo representar tanto toneladas movimentadas (informação nas barras), quanto custo (informação na linha).

Figura 6.12: Variação dos custos totais e dos volumes movimentados por CIL, considerando diferentes pesos atribuídos à função objetivo

Enfatiza-se que na situação em que a dimensão ambiental é privilegiada ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ), embora uma quantidade menor de CILs seja indicada para abertura (82 estruturas), menos facilidades são abertas com o volume mínimo estabelecido (42,7% contra 51,1% dos outros dois cenários). Os CILs que movimentam mais de 1.000.000t concentram 69,45% de toda carga atraída nos cenários econômico e referencial, enquanto no ambiental este valor sobe para 76,5%.

Quanto às regiões indicadas à abertura nos cenários econômico e referencial, apenas uma região diverge entre àquelas que concentram 69,45% de carga: Vilhena - RO aparece movimentando 1.328.820 t no cenário econômico, enquanto no cenário referencial esta região está entre as que movimentam o volume mínimo, sendo substituída por Itapecuru Mirim - MA (com 1.128.410 t). As demais regiões que compõem os 69,45% do volume são coincidentes, alterando apenas a quantidade de carga movimentada pelos CILs.

Ainda, entre estes cenários há divergência de apenas duas regiões: Feira de Santana - BA não aparece no cenário referencial e Dianópolis - TO não aparece no econômico (no entanto, ambos estão presentes em  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ). O cenário ambiental ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ), por sua vez, tem 71 regiões coincidentes aos casos mencionados

anteriormente, conforme apresentado na Figura 6.13. Optou-se por comparar os resultados do cenário ambiental apenas com o referencial, tendo em vista que apenas uma região diverge entre o referencial e o econômico (como elucidado no início deste parágrafo).

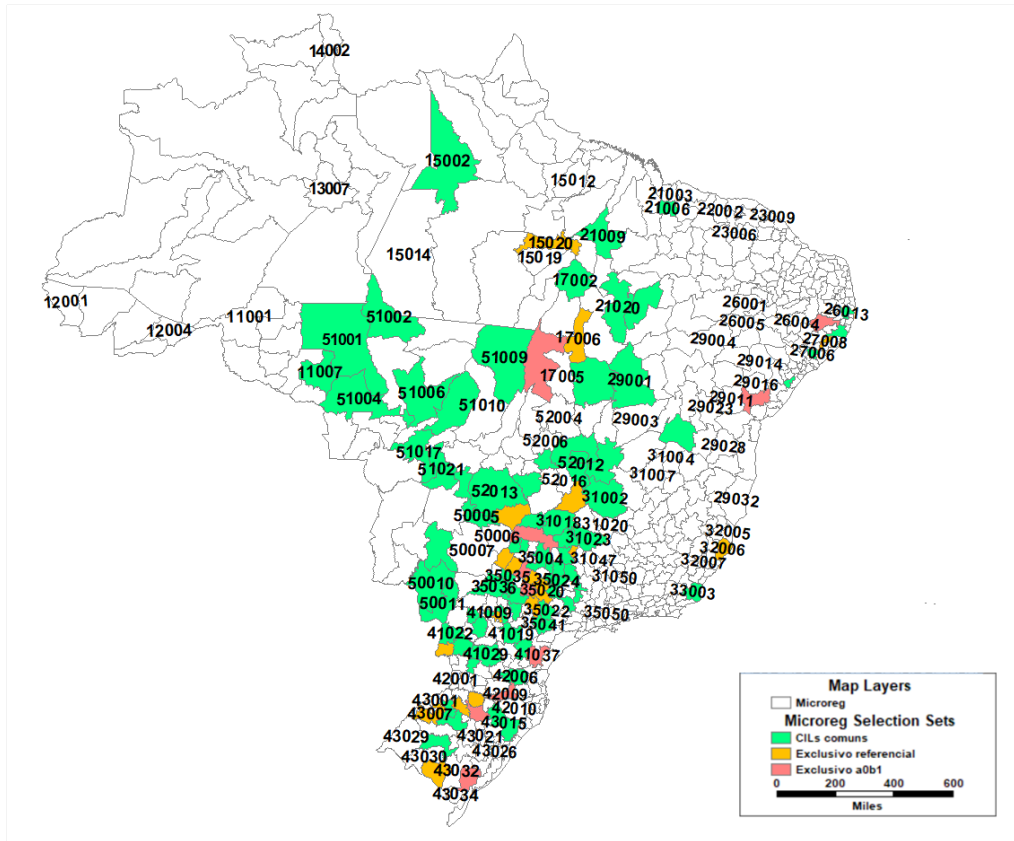


Figura 6.13: Comparação entre os CILs habilitados no cenário referencial e no ambiental ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ )

Verifica-se na Figura 6.13 que as localidades a seguir não foram indicadas para abertura no cenário ambiental: Serrana dos Quilombos - AL, Maraba - PA, Porto Nacional - TO, Linhares - ES, Andradina - SP, Ituverava - SP, Araçatuba - SP, Lins - SP, Bauru - SP, Ourinhos - SP, Apucarana - PR, Foz do Iguacu - PR, Erechim - RS, Santo Angelo - RS, Carazinho - RS, Campanha Meridional - RS, Catalao - GO e Quirinopolis - GO. Não obstante, há regiões exclusivas deste cenário ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ): Rio Formoso - TO, Vale do Ipojuca - PE, Frutal - MG, Birigui - SP, Marilia - SP, Curitiba - PR, Curitibaanos - PR, Passo Fundo - RS e Pelotas - RS. Com exceção de Curitiba - PR e Rio Formoso - TO, as demais regiões aparecem.

Retomando a discussão sobre todos os cenários da Tabela 6.4, observa-se uma pequena variação do custo total: de 0,001% ( $\alpha = 0,6$  e  $\beta = 0,4$ ) a 5,857% ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ), em relação ao cenário de menor custo (referencial, onde  $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$ ). Ressalta-se que, em oito situações, a variação percentual em relação ao cenário de menor custo é inferior a 0,05%.

Observa-se o menor valor financeiro associado à emissão de carbono no cenário  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ , visto que o modelo busca determinar a localização total de CILs levando em consideração apenas a parte da função objetivo referente às emissões. Verifica-se, portanto, que o valor de emissões chega a ser 3,75% menor que o cenário referencial e 4,30% menor que a maior emissão (encontrada no cenário diametralmente oposto, onde  $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$ ).

De maneira análoga, o menor custo logístico é obtido no cenário  $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$ , em que a determinação das regiões ótimas para abertura de CILs considera apenas a minimização dos custos logísticos. Os custos, neste caso, têm uma variação bem menos sensível aos pesos que no cenário referencial (apenas 0,017%). Não obstante, chega a ser 6,63% menor que o máximo custo logístico encontrado (cenário  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ). A Figura 6.14 apresenta a participação dos custos logístico e de emissão na composição do custo total, em cada caso.

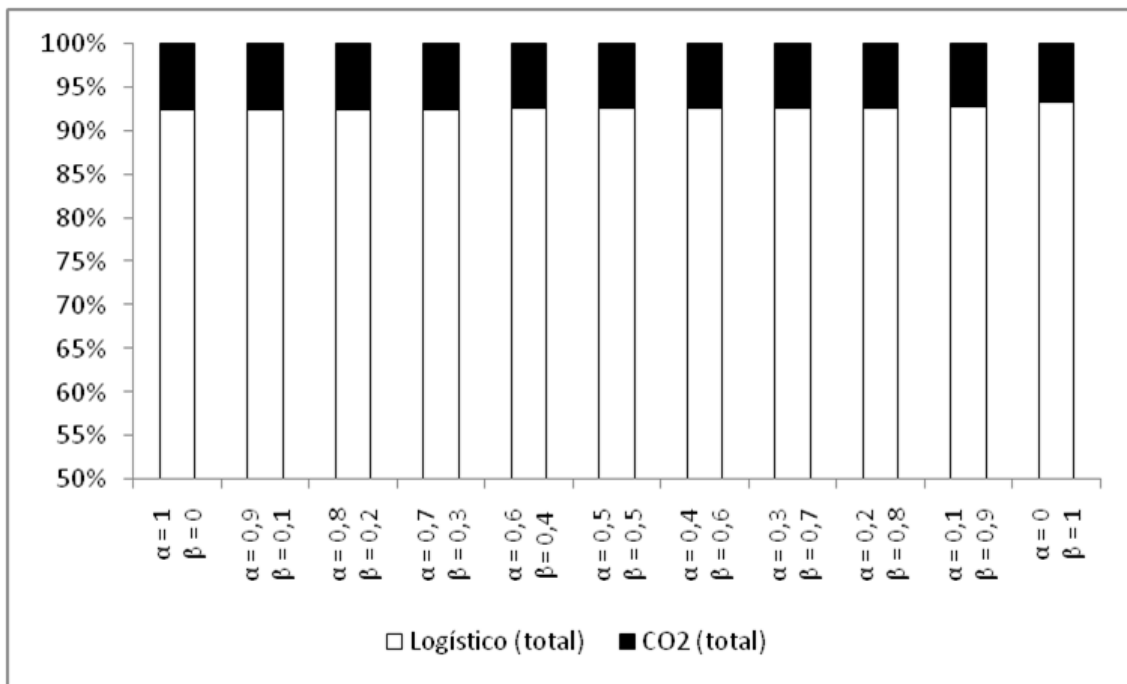


Figura 6.14: Proporção o custo logístico e de emissão de carbono na composição do custo total, considerando diferentes pesos atribuídos à função objetivo

Nota-se que em todos os cenários a composição do custo logístico é preponderante em relação ao custo associado à emissão de carbono. Isso reflete na quantidade de CILs indicados para abertura e também na variação dos custos. Como o custo logístico chega a ser 13,72 vezes maior que o custo de emissão, o impacto dos pesos no processo decisório só é observado quando se dá ênfase total à dimensão ambiental ( $\alpha = 0$ ;  $\beta = 1$ ). A partir do momento que há atribuição de pesos à dimensão econômica (ainda que seja de apenas 10%), essa diferença de magnitude dos custos se torna preponderante na definição dos custos totais e dos locais candidatos à



abertura de CILs. Esta relação pode ser observada na Figura 6.15.

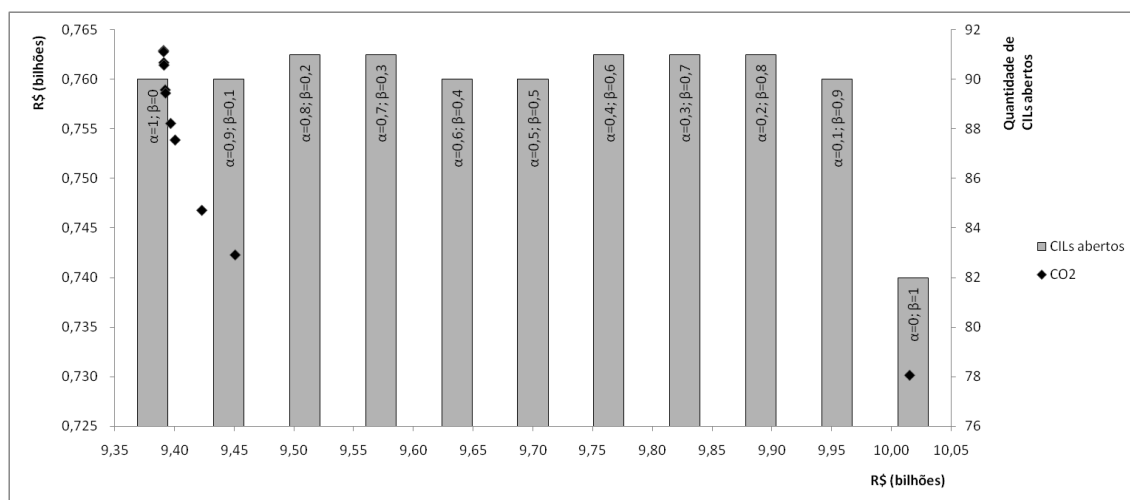


Figura 6.15: Relação entre o custo logístico, de emissão e número de CILs abertos considerando diferentes pesos atribuídos à função objetivo

Desta maneira, optou-se por refazer a avaliação do cenário referencial considerando um custo de carbono que equiparasse o valor financeiro associado aos termos econômicos e ambientais (cenário *carbon tax restritivo* - Seção 6.1.6). Em termos práticos, esta situação refletiria uma ação governamental que impusesse uma política de taxa de carbono muito restritiva, visando registrar menores níveis de emissão. Do ponto de vista matemático, busca-se “forçar” o modelo proposto (mantendo os demais parâmetros) a equilibrar as dimensões econômica e ambiental nas decisões sobre localização.

Destaca-se que, o resultado obtido nesta seção sugere, também, que as políticas ambientais direcionadas ao setor de transporte precisam ser, de fato, restritivas para que o setor privado dedique atenção às ações de mitigação das emissões, tanto quanto busca eficiência operacional.

Não obstante, é importante enfatizar que há redução na emissão de carbono conforme se aumenta o peso dado à dimensão ambiental, conforme Figura 6.16. Observa-se que a emissão chega a ser 4,3% menor no cenário em que se atribui peso apenas à dimensão ambiental da Função Objetivo ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ), em relação ao extremo em que se atribui peso apenas à dimensão econômica ( $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$ ).

Além disso, o menor valor de emissão observado na Figura 6.16 é 3,8% inferior ao cenário referencial. Desta forma, a emissão do cenário ambiental ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ) foi usada como limitante superior nos cenários *carbon cap*. Embora o menor nível de emissão observado até o momento tenha sido àquele obtido no cenário otimista (Seção 6.1.2), este não é suportado pela rede no cenário referencial, conforme será detalhado na Seção 6.1.5.

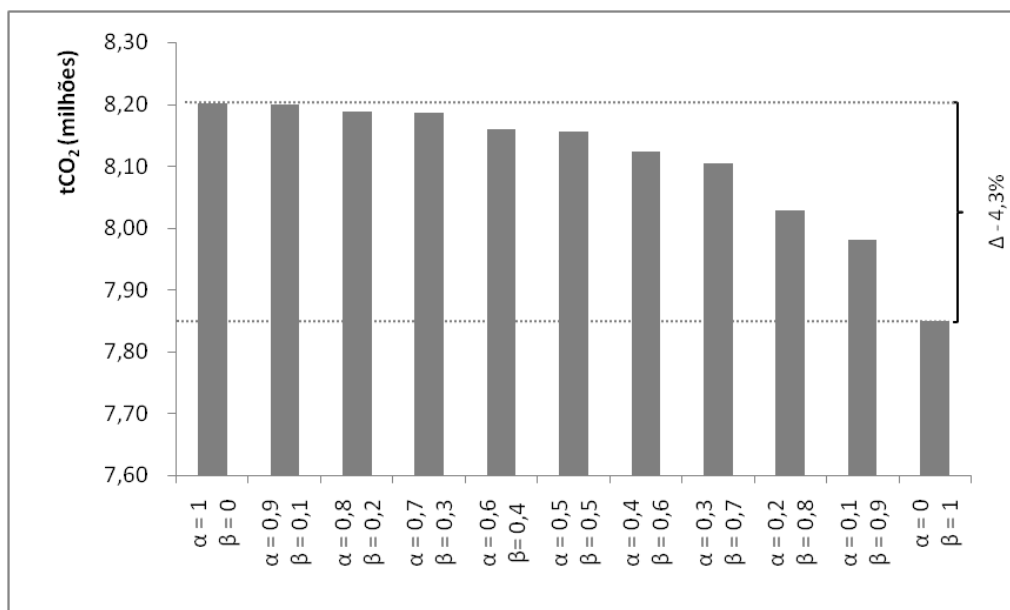


Figura 6.16: Emissão de carbono considerando os diferentes pesos atribuídos à Função Objetivo

#### 6.1.4 Aplicação: Política *carbon cap*

Nesta seção, avalia-se a aplicação de uma política *carbon cap*, ou seja, onde há uma quantidade máxima definida de emissões para o setor de transportes, não havendo a possibilidade de superar este limite (em função da inexistência de mercado de carbono estabelecido - *carbon trade*). Enfatiza-se que, neste caso, as emissões não são taxadas, portanto, assumiu-se valor igual a zero para  $C_c$  na Função Objetivo (4.16).

Pela primeira vez, aplicou-se a Restrição (4.15), impondo-se um limite máximo de emissões ( $C^{\text{cap}}$ ) equivalente a 7.849.136,36 t (considerando transporte direto e por meio de CILs). Este valor foi obtido na Seção 6.1.3, no cenário  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$  em que se busca determinar a localização ótima atribuindo peso somente à dimensão ambiental da Função Objetivo. Com isso, entende-se que este é o menor nível de emissão possível no cenário referencial.

Assim, observa-se que, ao se adotar uma política *carbon cap*, a decisão de localizar (ou não) o CIL em determinada região, bem como a alocação dos fluxos, deve ser feita com base no custo logístico (uma vez que o custo de emissão é equivalente a zero), respeitando a quantidade máxima de emissão de carbono imposta pela Restrição (4.15).

Verificou-se que o resultado obtido neste cenário é muito semelhante ao resultante em  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ . A indicação das microrregiões permanece a mesma (82 CILs habilitados), com destaque para Alto Teles Pires - MT com 9.609.270 t movimentadas em ambos os casos. Diverge-se, apenas, na quantidade de carga atraída

por algumas facilidades: Cuiabá - MT atrai 1.562.210 t em  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$  e 1.000.000 t no cenário *carbon cap*. No entanto, a quantidade total movimentada por CILs é a mesma nos dois cenários: 148.956.990 t.

No cenário *carbon cap* foram habilitadas 36 estruturas com a quantidade mínima de 1.000.000 t, enquanto no cenário com  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$  foram abertas apenas 35 nesta condição. No primeiro caso, os CILs que atraem mais de 1.000.000 t representam, em conjunto, 75,83% da movimentação total, enquanto, no segundo caso, este valor sobe para 76,5%.

O custo logístico com CILs no cenário *carbon cap* é ligeiramente menor (0,07%) e o custo total (CILs + direto) tem uma redução de apenas 7,36% em relação ao cenário  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ . Isso pode ser explicado pelo fato do custo de emissão ser significativamente menor que o logístico (como fora apresentado nas Seções 6.1.2 e 6.1.3). Assim, mesmo quando o custo de emissão não é considerado, o impacto no custo total é baixo.

Como os resultados do cenário  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$  foram apresentados na Seção 6.1.3, optou-se por não detalhá-los novamente aqui. Dessa maneira, resolveu-se avaliar uma política governamental um pouco mais restritiva em que, além de limitar a quantidade máxima de carbono emitida (*carbon cap*), cobra-se uma taxa por toda tonelada emitida (*carbon tax*). Os resultados estão descritos na Seção 6.1.5.

Ressalta-se que quando se impõe uma limitação de carbono inferior ao *carbon cap* estabelecido neste cenário, não se obtém solução viável (o que é esperado, tendo em vista que se adotou o nível de emissão do cenário  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ , ou seja, em que a localização das facilidades adota como critério de otimização apenas o custo de emissão de CO<sub>2</sub>).

Na prática, isso indica que mesmo se as emissões não fossem taxadas, nem houvesse um valor máximo estabelecido para investimentos em CILs, a rede atual não suportaria a imposição de reduções bruscas nas emissões. Em outras palavras, a intermodalidade, em si, não seria capaz de proporcionar uma redução maior que 3,753% dos índices de emissão em relação ao cenário referencial (percentual observado na Tabela 6.4).

### **6.1.5 Aplicação: Adoção simultânea das políticas *carbon cap* e *carbon tax***

Como estratégia para redução das emissões de carbono, o governo pode optar por adotar, de maneira conjunta, políticas de taxaço e de imposição de um limite máximo para o volume de emissão permitido. Assim, neste cenário, adotaram-se as mesmas premissas do anterior, porém,  $C_c$  assumiu o valor mesmo valor adotado no cenário referencial (taxa de R\$ 93,02/t). Como não há possibilidade de compra de

créditos de carbono, entende-se que este cenário desincentivará o uso de alternativas com maior potencial de emissão, uma vez que a emissão está sendo duplamente considerada (pela taxaço e pela restrição de máximo).

Nestas condições, obteve-se exatamente o mesmo resultado do cenário *carbon cap*: 82 CILs indicados para abertura, com destaque para Alto Teles Pires - MT. Pela primeira vez, as mesmas regiões foram habilitadas movimentando exatamente a mesma quantidade e composição de cargas. A única diferença observada foi na composição do custo total: a quantidade de carbono emitida foi exatamente a mesma (equivalente ao limitante superior), mas tendo em vista que toda emissão é taxada, o custo total do CIL que era de R\$ 9,047 bilhões no cenário *carbon cab*, passou a ser R\$ 9,754 bilhões. Como reflexo, o custo total da rede neste cenário é 7,36% superior ao anterior.

Testou-se, também, se haveria alteração nas localizações ótimas caso mantivessem-se as premissas anteriores ( $C_c = \text{R\$ } 93,02$ ,  $C^{\text{cap}} = 7.849.136,36$  t, matriz de emissão média), porém alterassem os pesos da Função Objetivo, priorizando-se a dimensão ambiental ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ). Neste caso, as microrregiões habilitadas permaneceram as mesmas, o volume máximo atraído também se manteve, havendo pequenas alterações nos volumes movimentados por cada CIL. Destaca-se que Cuiabá passou a movimentar 1.839.350 t, e, como reflexo, apenas 35 CILs atraíram o volume mínimo de carga. A variação de custos entre  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$  no cenário referencial (R\$ 10,745 bilhões);  $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$  com  $C^{\text{cap}}$  (R\$ 10,738 bilhões); e  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$  com  $C^{\text{cap}}$  (R\$ 10,747 bilhões) não chega a 0,02%.

Tendo em vista a baixa participação do custo de carbono na composição do custo total, testou-se o comportamento do modelo com uma política de carbono de taxaço mais restritiva, aproximadamente dez vezes maior que a atual. Dessa maneira, mantiveram-se a limitação máxima de emissão equivalente a 7.849.136,36 t (obtida no cenário  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ) e os demais parâmetros adotados no cenário referencial (pesos iguais e emissão média), mas elevou-se o  $C_c$  para R\$ 1.000.

Como resultado, foram indicadas para abertura as mesmas 82 facilidades (tendo sido 36 delas habilitadas com o volume mínimo), alterando-se, no entanto, a quantidade de carga movimentada pelas mesmas. Não obstante, o volume total atraído por CILs neste cenário permaneceu sendo 148.956.990 t, com destaque para a estrutura de Alto Teles Pires - MT. Salienta-se que o custo total se elevou para R\$ 17,857 bilhões, tendo em vista o aumento da taxa associada à emissão de carbono (o custo logístico, neste cenário é 0,002% inferior ao cenário cuja  $C_c$  adotado fora de R\$ 93,07).

Adicionalmente, esclarece-se não ser necessário avaliar políticas mais restritivas do ponto de vista da limitação das emissões, tendo em vista que o menor valor suportado pela rede foi obtido no cenário ambiental ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ), apresentado

na Seção 6.1.3. Assim, considerando o conjunto de parâmetros e restrições, não há resultados viáveis para um  $C^{\text{cap}}$  inferior a 7.849.136,36 t. Ou seja, caso política pública deste nível fosse implantada, não seria possível atender às demandas dos quatro produtos solicitados sem exceder a limitação de carbono imposta.

Dessa forma, mantendo a configuração atual da rede logística, não seria possível impor ao cenário referencial uma limitação de emissões equivalente àquela verificada no cenário otimista (6.428.193,56 t, menor valor registrado em todos os cenários investigados), por exemplo. Portanto, embora a intermodalidade seja relevante na redução dos custos totais e das emissões, por si só, ela não seria capaz de proporcionar nem 5% de redução das emissões totais.

Assim sendo, além de obras de infraestrutura (que criem novos trechos ou adequem os atuais, visando promover a intermodalidade), o planejamento estratégico do setor também deve se preocupar com a formulação de políticas públicas que fomentem melhorias tecnológicas e operacionais no setor de transporte.

Enfatiza-se que compreender os níveis de redução suportados pela rede é relevante, pois ajuda o gestor a avaliar, durante o processo de planejamento, se as ações propostas irão proporcionar o efeito esperado (por exemplo, atender às metas estabelecidas pelos acordos internacionais mencionados no Capítulo 3, tendo em vista que o setor de transporte responde pela maior parte das emissões de carbono do país). Dessa maneira, o modelo matemático proposto se mostra útil ao processo de planejamento governamental deste setor.

Na Seção 6.1.6 resolveu-se estressar os valores adotados para  $C_c$ , de maneira a compreender como a rede se comportaria caso os custo de emissão fossem tão elevados ou até superiores ao custo logístico.

### **6.1.6 Aplicação: Política *carbon tax* mais restritiva**

De maneira a avaliar um cenário em que os custos de emissão tenham a mesma magnitude que os custos de carbono, replicou-se o cenário referencial (Seção 6.1.1), alternando, no entanto, o valor de  $C_c$  de R\$ 93,02 para R\$ 1.000. Adicionalmente, optou-se por avaliar políticas *carbon tax* mais restritivas, ou seja, em vez de determinar a quantidade máxima que o setor poderia emitir, avaliou-se o comportamento da emissão caso houvesse uma penalização mais alta (maiores taxas) para cada tonelada de carbono emitida. Assim, foram avaliados quatro preços: R\$ 93,02 (cenário referencial), R\$ 1.000 (magnitude semelhante ao custo logístico), R\$ 5.000 e R\$ 10.000.

Como resultado, continuaram sendo indicadas 90 microrregiões para abertura para custos de carbono até R\$ 1.000, reduzindo para 85 estruturas ao custo de R\$ 5.000 e 84 facilidades ao custo de R\$ 10.000. Entretanto, mesmo nos cenários em que

a quantidade de CILs habilitados é igual, a disposição espacial destes foi alterada (conforme Figura 6.17).

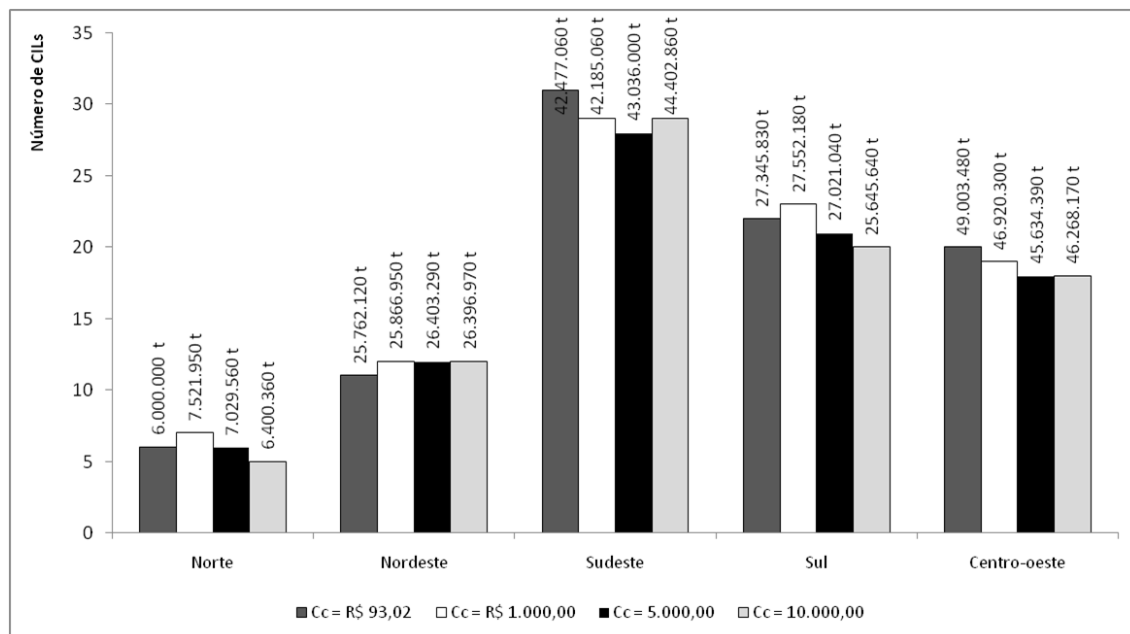


Figura 6.17: Distribuição espacial dos CILs habilitados no cenário referencial, considerando diferentes valores de  $C_c$

Ressalta-se que a importância relativa da microrregião Cuiabá - MT reduz com o aumento do custo de carbono. No cenário referencial este é o sexto CIL de maior movimentação (com 3.309.890 t), sendo que nos demais ele é habilitado com a quantidade mínima (1.000.000 t). Além disso, há estruturas indicadas para abertura que não aparecem no cenário referencial, mas estão presentes nos demais, quando o custo de carbono sobrepuja o custo logístico. São elas: Rio Formoso - TO, Feira de Santana - BA, Frutal - MG, Curitiba - PR e Pelotas - RS.

Destaca-se, no entanto, que apenas Rio Formoso - TO no cenário em que  $C_c = R\$ 10.000$  atrai mais de 1.000.000 t. Ainda, assinala-se que a importância relativa de Araraquara aumenta quando  $C_c = R\$ 10.000$ , passando a ocupar a 8ª colocação entre os CILs mais relevantes (sua “pior” posição é a 38ª no cenário referencial).

Alto Teles Pires - MT é o CIL mais relevante para todos os valores de  $C_c$  analisados nesta seção, seguido por Aripuana - MT no cenário referencial e por Parecis - MT nos demais. Os dois primeiros CILs respondem por mais de 10% da carga atraída para qualquer valor de  $C_c$ . Salienta-se que a composição dos sete CILs de maior relevância é igual para os casos em que  $C_c = 5.000$  e  $C_c = 10.000$ . Observa-se ainda que, conforme aumenta o custo de carbono, reduz-se a quantidade de CILs habilitados com a quantidade mínima. Os CILs que movimentam mais de 1.000.000 t consolidam 69,45% da carga quando  $C_c = 93,02$  e 77,20% quando  $C_c = 10.000$ .

Assim, nota-se que o fato de habilitar mais estruturas em determinada região

não significa, necessariamente, que elas atraíam maior volume de carga (vide relação entre CILs do Sul e Centro-oeste). O volume total de carga atraída pelas estruturas variou entre 0,36% e 0,98%, entretanto, o impacto observado nas emissões totais chegou a 3,63%.

O custo total, obviamente, é maior (chegando a ser até 87 vezes superior, por conta da taxação de carbono). Como resultado, a composição do custo total se alterou consideravelmente, conforme apresentado na Figura 6.18. Não obstante, os custos associados ao transporte por meio de CIL continuam respondendo pela maior parcela: variando de 91,35% a 96,23% dos custos totais. Salienta-se, no entanto, que a economia proporcionada pelo uso dos CILs chega a ser 250 vezes maior que o custo total da rede.

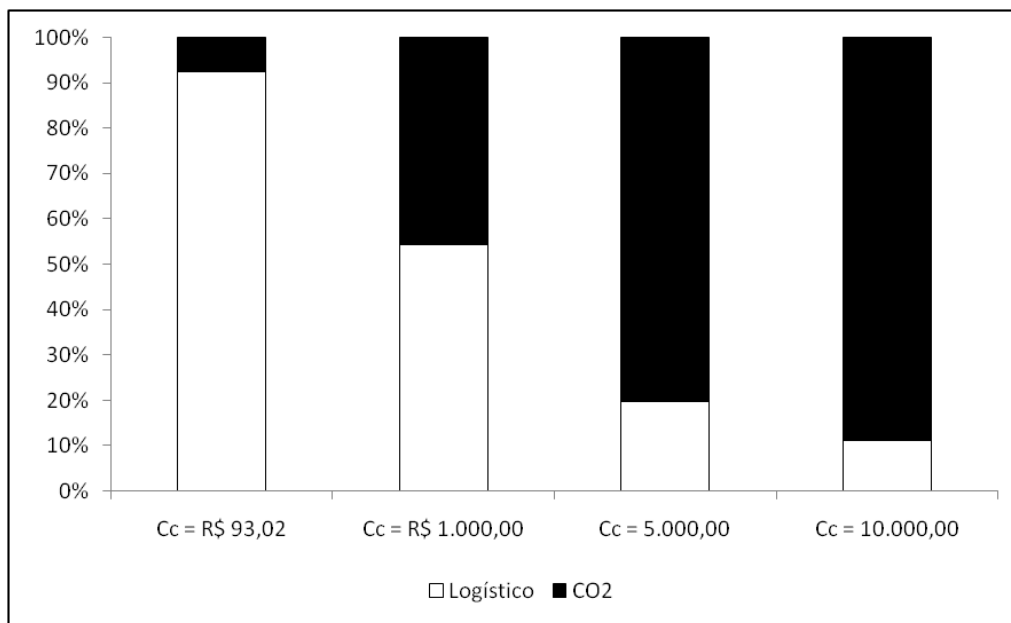


Figura 6.18: Relação entre os custos logísticos e CO<sub>2</sub> na composição do custo total para diferentes valores atribuídos ao  $C_c$  no cenário referencial

No que diz respeito às emissões, enfatiza-se a redução observada a partir do aumento da taxação de carbono (conforme Figura 6.19). Quando  $C_c = 10.000$  a emissão total da rede se aproxima bastante do  $C^{cap}$  imposto nas Seções 6.1.4 e 6.1.5.

Associada à economia mencionada, destaca-se que o uso de CILs aumentou a economia relacionada às toneladas de carbono emitidas (ainda que isso represente apenas 0,01%). No cenário referencial padrão, 1.887.415.130 t de carbono deixaram de ser emitidas, enquanto neste com  $C_c = 1.000$ , o valor subiu para 1.887.618.417 t. Em outras palavras, o uso da intermodalidade permitiu evitar a emissão de 1,89 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em comparação a uma malha totalmente rodoviária (ou seja, sem o uso de CILs).

Com o aumento do valor da taxa associada à emissão, no entanto, a economia reduziu um pouco: caiu para 1,78 bilhões quando  $C_c = 5.000$  e 1,76 bilhões quando

$C_c = 10.000$ . Não obstante, é preciso enfatizar que a emissão total também reduziu, conforme evidenciado na Figura 6.19.

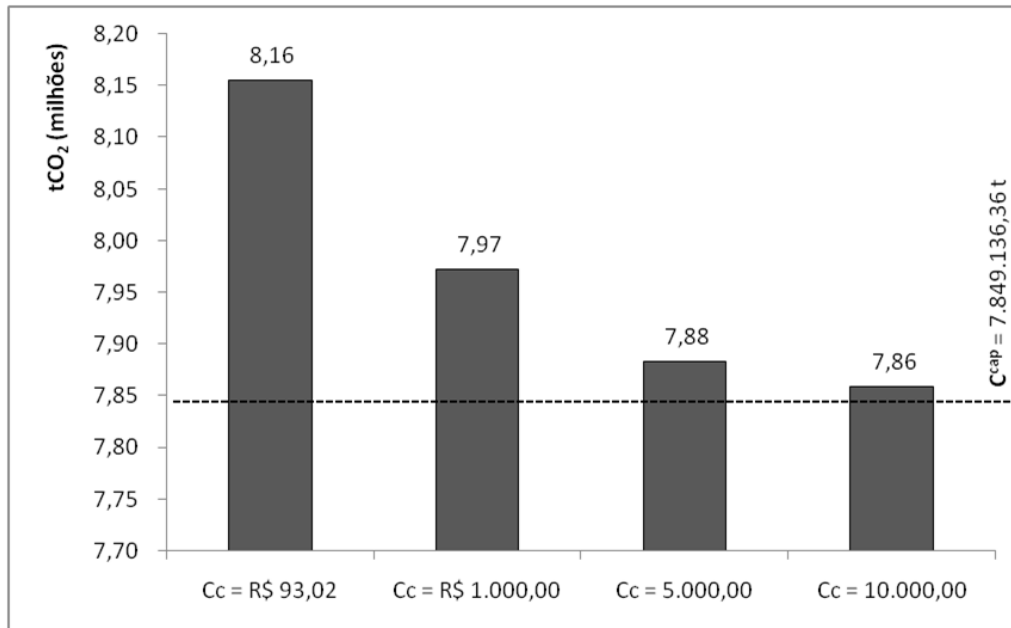


Figura 6.19: Emissão de CO<sub>2</sub> com variação do  $C_c$  no cenário referencial

Dessa maneira, como já sinalizado nas seções anteriores, ratifica-se aqui que com a configuração da rede de transporte adotada neste trabalho, mesmo com as intervenções previstas no PNLT, não seria possível aplicar altos percentuais de redução das emissões. Assim, além de maior incentivo à intermodalidade (com novas obras de infraestrutura, criação de terminais intermodais etc), reforça-se que seria necessário adotar outro tipos de medidas.

Esta observação é consonante com a indicação de Wanke et al. (2015). Ao estudar cadeia de suprimentos, os autores sinalizaram que a imposição de taxas razoáveis de emissão não seriam suficientes para proporcionar a redução esperada das emissões. Assim, os autores indicam a necessidade de incentivar inovações tecnológicas ao setor de transporte para que se reduza a pegada de carbono, sem prejudicar o desempenho das cadeias de suprimentos - pela definição de taxas de emissão impraticáveis.

Dentre as possíveis ações, pode-se citar: melhorias na tecnologia dos veículos, estudos de composição da frota, alteração no tipo de combustível utilizado (optando por alternativas mais “limpas”) e gestão do transporte (*eco-driving*, renovação de frota etc.). Para fomentar tais ações nos atores privados, o ente governamental precisaria desenvolver políticas públicas específicas incentivando estudos nestas áreas (e.g. investimento em pesquisa para energias renováveis) ou promulgando leis que impusessem tais melhorias (e.g. idade máxima para frota em circulação).

Por fim, diante dos resultados observados, decidiu-se avaliar o comportamento da rede extrapolando o valor de  $C_c$  para R\$ 50 mil. Entende-se que é um valor



impraticável (assim como R\$ 10 mil)<sup>2</sup>, tendo em vista que o crédito de carbono estava sendo comercializado a menos de R\$ 100,00 quando esta pesquisa foi desenvolvida<sup>3</sup>. Neste caso, foram abertos 82 CILs a um custo total da rede equivalente a R\$ 402,471 bilhões.

No que diz respeito às emissões, chegou-se muito perto do  $C^{\text{cap}}$  definido, entretanto, ainda assim, não foi possível alcançá-lo. Foram emitidas 7.849.466,10 t, ou seja, 329,74 t a mais do que o limite imposto. Verifica-se, portanto, haver um *trade-off* claro entre o custo total da rede e o objetivo de redução das emissões, que se acentua com o aumento da taxa de carbono. Ao elevar o  $C_c$  de 10 mil para 50 mil, verifica-se que a redução em cada tonelada emitida resulta em uma grande alteração dos custos totais: quando  $C_c = 10.000$  emite-se 0,12% a mais a um custo 78% menor que em  $C_c = 50.000$ .

Dessa maneira, caso opte por uma estratégia *carbon tax*, o governo deve avaliar o equilíbrio entre custos e emissões para adoção de uma política pública efetiva e que, de fato, fomente não só a intermodalidade, mas impacte positivamente na economia e as cadeias de suprimentos que têm sua eficiência diretamente impactadas pelo sistema de transporte.

Neste contexto, considerou-se relevante avaliar um cenário em que são determinados custos de abertura das facilidades. Assim, na Seção 6.1.7 avalia-se o comportamento da rede considerando este custo adicional (na composição do custo logístico), associado a políticas de carbono. Tendo em vista que adotar custo de abertura do CIL afastaria, ainda mais, o custo logístico do custo de emissão, optou-se por avaliar cenários em que houvesse, além da taxa de emissões, a imposição da quantidade máxima de carbono a ser emitida.

### 6.1.7 Aplicação: Cenário com custo de abertura dos CILs associado à política *carbon tax* e *carbon cap*

Tendo em vista que o CIL é uma estrutura de interesse governamental e que, por isso, independente dos custos associados à sua abertura haveria esforço institucional para implantação destas facilidades, os cenários desenvolvidos nesta tese assumiram um custo simbólico de R\$1,00 (representado pelo parâmetro  $g_k$  na Função Objetivo). No entanto, entende-se que em períodos de contingenciamento, a análise considerando custos de abertura se torna relevante. Enfatiza-se que a discussão feita nesta

---

<sup>2</sup>Para fins de comparação, os valores encontrados na literatura são: \$100/tCO<sub>2</sub> em Abdallah et al. (2012), \$0,6/kgCO<sub>2</sub> em Fareeduddin et al. (2015) e 1 Yuan/kgCO<sub>2</sub> em Liqiang e Guoxin (2015). Salienta-se que nos dois primeiros casos, não está definido se o valor está em dólar ou euros, apenas é indicada a unidade monetária \$.

<sup>3</sup>O maior valor de abertura observado de 20/08/2009 a 01/08/2019 - recorte histórico disponível na fonte pesquisada - foi de €29,75, sendo a média €10,83 (investing.com, 2019). Considerando apenas o último ciclo de um ano, o maior valor permanece o mesmo e a média sobe para €22,72.

seção não tem caráter de estudo de viabilidade. Busca-se, apenas, avaliar as regiões indicadas a abertura caso custos de implantação (ainda que parciais, como uma contrapartida pública em um regime de parceria Público-Privado, por exemplo) fossem considerados.

Dessa maneira, foram avaliadas quatro situações: (i) custo de implantação equivalente a R\$ 30 milhões, sem limite de emissão ( $C^{cap}$  livre) e com demais parâmetros iguais aos do cenário referencial; (ii) i) custo de implantação equivalente a R\$ 30 milhões, com limite de emissão ( $C^{cap} = 7.849.136,36$  t) e com demais parâmetros iguais aos do cenário referencial; (iii) custo de implantação equivalente a R\$ 100 milhões, sem limite de emissão ( $C^{cap}$  livre) e com demais parâmetros iguais aos do cenário referencial; e, (iv) custo de implantação equivalente a R\$ 100 milhões, com limite de emissão ( $C^{cap} = 7.849.136,36$  t) e com demais parâmetros iguais aos do cenário referencial. Salienta-se que os cenário (i) e (iii) avaliam apenas a política *carbon tax*, já os (ii) e (iv) combinam as políticas *carbon tax* e *carbon cap*.

Verifica-se que, quando não é imposta uma quantidade máxima de emissão de carbono, o número de CILs indicados para abertura reduz drasticamente. Com  $g_k = 30$  milhões são habilitadas apenas 37 facilidades, enquanto  $g_k = 100$  milhões este valor cai para 20. Em nenhum outro cenário avaliado nesta tese, em que  $\bar{p}$  é livre (ou seja, a Restrição (4.12) não está sendo aplicada) tão poucas estruturas foram indicadas para abertura. A Figura 6.20 apresenta a relação de custos associadas a cada cenário analisado. Ressalta-se que  $g_k = 1$  diz respeito ao cenário referencial apresentado na Seção 6.1.1.

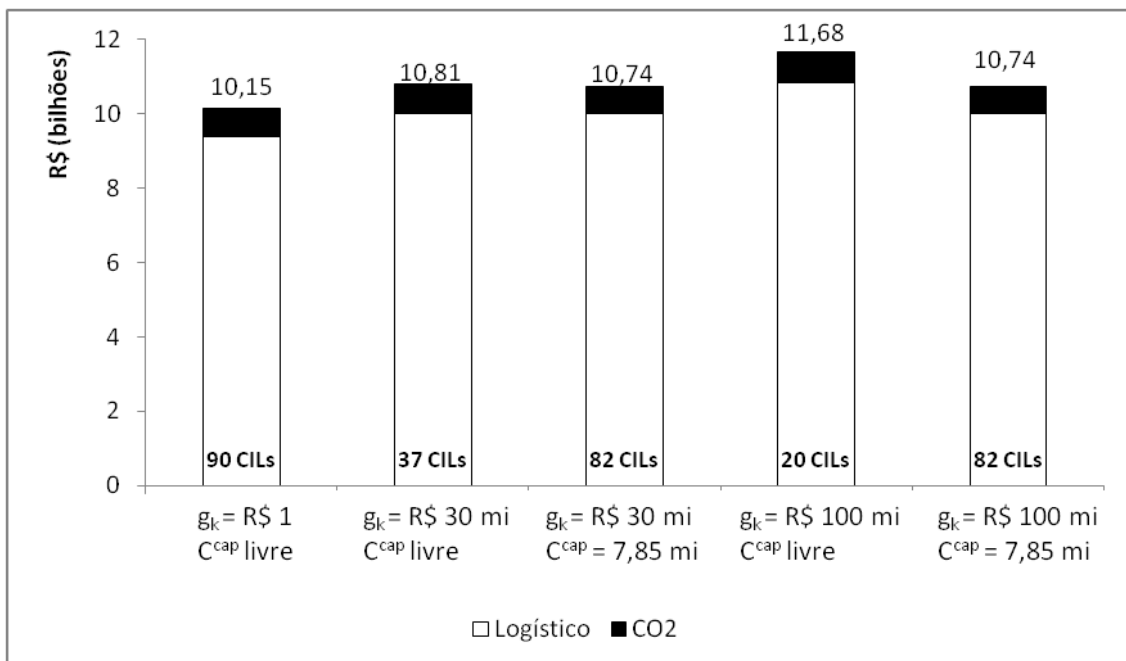


Figura 6.20: Relação entre os custos logísticos e de emissão na composição do custo total, considerando diferentes valores de  $g_k$

Quando se impõe uma quantidade máxima de carbono a ser emitida pela rede (pela Restrição (4.15)), a quantidade de CILs abertos volta a ser semelhante aos valores obtidos nos cenários avaliados nas demais seções: são indicadas 82 microrregiões, tanto para  $g_k = 30$  milhões quanto para  $g_k = 100$  milhões.

Verifica-se que a variação dos custos totais da rede em relação a quantidade de CILs abertas é pequena (aproximadamente 9%). No entanto, os menores custos totais são observados quando se aumenta o número de facilidades abertas. Ressalta-se que não foi avaliado o ponto de inflexão, quando os custos de abertura do CIL começam a sobrepujar os custos totais e passa a ser mais econômico abrir menos estruturas.

Salienta-se que as microrregiões ótimas e os custos logísticos e de emissão são idênticos nos cenários em que há custo de abertura com CIL ( $g_k$ ) e limitação da quantidade máxima a ser emitida ( $C^{cap}$ ). Embora as regiões e o volume total de carga movimentado seja o mesmo, os volumes atraídos por produto em cada CIL diverge. Além disso, os volumes movimentados de cada produto entre dois pares O/D por meio de CILs também varia. Isso explica que a similaridade dos resultados é apenas uma coincidência. Sugere, também, que ao impor um limite máximo de emissão, essa restrição se torna forte na determinação das regiões ótimas para abertura. Por fim, no que diz respeito às emissões, tem-se a Figura 6.21.

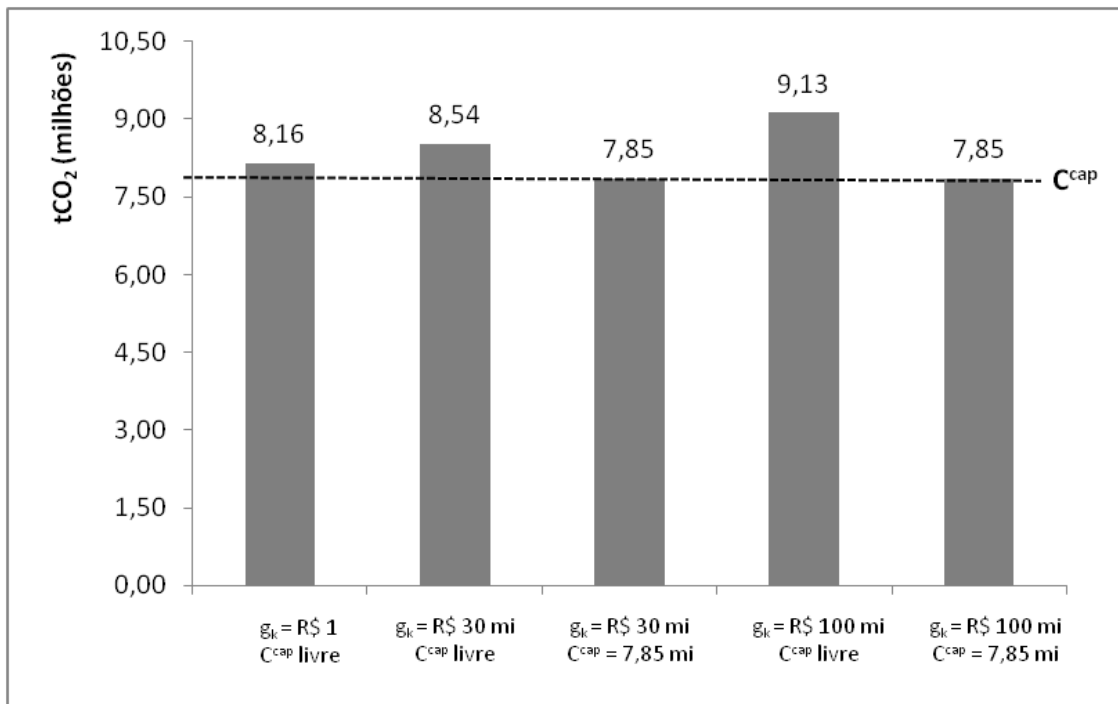


Figura 6.21: Emissão de carbono considerando diferentes custos de abertura do CIL e a política *carbon cap*

Observa-se que, com o aumento no custo de abertura dos CILs, a quantidade de carbono emitida também se elevou (para os casos em que o *cap* era livre). Isso

pode ser explicado pela redução no número de facilidades abertas. Tendo em vista este efeito observado nas emissões, a Seção 6.1.8 avalia o comportamento da rede quando se impõem um número máximo de estruturas a serem abertas.

### 6.1.8 Aplicação: Definição da quantidade máxima de CILs a serem abertos - similar ao problema de p-medianas

Nesta seção foram definidas quantidades máximas de estruturas que poderiam ser habilitadas de maneira a verificar as alterações nas localizações ótimas, considerando diferentes políticas públicas ou restrições de natureza governamental que pudessem limitar a quantidade de CILs a serem abertos. Dessa forma, adotou-se a Restrição (4.12) e variou-se o valor de  $\bar{p}$  de 10 a 90 estruturas. Limitou-se o valor máximo a 90, tendo em vista que este foi o número de CILs habilitados no cenários referencial. Portanto, não faria sentido abrir mais estruturas, tendo em vista que isso não proporcionaria maior redução dos custos totais.

Como esperado, os custos totais reduzem a medida que a quantidade de CILs habilitados aumenta. Considerando  $\bar{p} = 10$ , o custo total é 28% maior que no cenário referencial ( $\bar{p} = 90$ ). Ressalta-se, no entanto, que a variação dos custos a partir de  $\bar{p} = 50$  é pequena, sendo de 3,5% para  $\bar{p} = 50$ , 1,8% para  $\bar{p} = 60$ , 0,8% para  $\bar{p} = 70$  e 0,2% para  $\bar{p} = 80$ . A Figura 6.22 relaciona a evolução dos volumes movimentados por CILs e dos custos totais (por CIL e direto) associados a esta configuração da rede. Ressalta-se que a composição dos custos totais é praticamente a mesma em todos os casos (o custo logístico representa entre 92,53% e 92,86% do custo total).

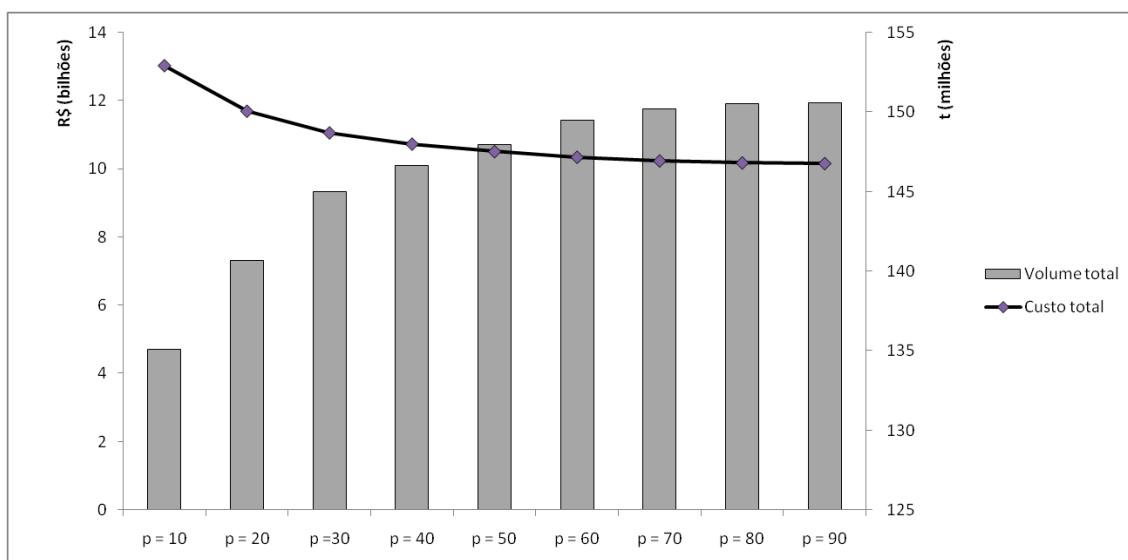


Figura 6.22: Relação entre o custo total e os volume movimentado para cada  $\bar{p}$

Observa-se, também, certa variação no volume movimentado por CILs (embora não tenha sido imposto nenhum limitante máximo para abertura/movimentação das

estruturas). O volume atraído pelas facilidades cresce a medida que novas estruturas são habilitadas, sendo 10% menor que o cenário referencial quando  $\bar{p} = 10$ . Não obstante, a partir de  $\bar{p} = 60$ , a variação é menor que 1%.

No que diz respeito à distribuição espacial das facilidades, as regiões ótimas divergem bastante quando há restrição sobre a quantidade de estruturas a serem abertas. Com  $\bar{p} = 10$ , nenhuma facilidade é aberta no norte do país, quatro são habilitadas no centro-oeste e duas em cada uma das demais regiões. O maior volume de carga é atraído pelos CILs da região centro-oeste (50.394.590 t), seguido pela sudeste (34.564.790 t).

Em  $\bar{p} = 20$ , todas as facilidades habilitadas em  $\bar{p} = 10$  se mantêm, porém sua ordem de importância quanto à atratividade de cargas se altera. O CIL mais relevante em  $\bar{p} = 10$  é Ribeirão Preto - SP (com 20.943.200 t), enquanto em  $\bar{p} = 20$  se destaca Brasília - DF (com 12.416.330 t).

Em  $\bar{p} = 30$  a facilidade mais relevante continua sendo Brasília - DF (com 12.383.140 t). No entanto, a composição das facilidades não engloba todos os CILs habilitados em  $\bar{p} = 20$  (Marília - SP, São José do Rio Preto - SP e Piracicaba - SP não são indicados para abertura). Diferente dos cenários anteriores, neste é habilitada uma estrutura com o volume mínimo exigido: Santarém - PA (com 1.000.000 t).

Em  $\bar{p} = 40$ , Brasília sequer aparece entre as regiões habilitadas. A região mais relevante passa a ser Alto Teles Pires - MT (com 11.268.550 t). Os demais CILs habilitados em  $\bar{p} = 30$  se repetem em  $\bar{p} = 40$ , alterando, no entanto, sua ordem de importância quanto ao volume atraído. Neste cenário, apenas Santarém - PA é habilitado com a quantidade mínima de 1.000.000 t.

Todas as microrregiões indicadas para abertura em  $\bar{p} = 40$  permanecem habilitadas quando  $\bar{p} = 50$ . Alto Teles Pires - MT segue como CIL mais relevante, atraindo o mesmo volume que em  $\bar{p} = 40$  (11.268.550 t). Por outro lado, Santarém - PA continua sendo o único CIL habilitado com a quantidade mínima.

Com exceção de Alto Araguaia - MT, todos os CILs habilitados quando  $\bar{p} = 50$  se repetem em  $\bar{p} = 60$ . As nove primeiras regiões quanto ao volume atraído são as mesmas (embora haja alteração em suas posições), concentrando 37,2% da carga em  $\bar{p} = 50$  e 35% em  $\bar{p} = 60$ . O CIL que atrai a maior quantidade de carga continua sendo Alto Teles Pires - MT (11.066.540 t), que passou a ser seguido por Sudoeste de Goiás - GO (em vez de Aripuana - MT, que caiu da 2ª posição em  $\bar{p} = 50$  para 6ª em  $\bar{p} = 60$ ). Neste cenário, seis CILs são habilitados com a quantidade mínima de carga: Vilhena - RO, Santarém - PA, Lins - SP, Ponta Grossa - PR, Campo Grande - MS e Alta Floresta - MT.

Em  $\bar{p} = 70$ , repetem-se as microrregiões habilitadas em  $\bar{p} = 60$  e Alto Teles Pires - MT mantém a primeira posição atraindo 11.057.240 t. Neste cenário, dezessete

CILs são abertos com a quantidade mínima de carga: Vilhena - RO, Santarém - PA, Unai - MG, Paracatu - MG, Ituiutaba - MG, Lins - SP, Pirassununga - SP, Ponta Grossa - PR, Santo Angelo - RS, Ijuí - RS, Vacaria - RS, Campo Grande - MS, Cassilandia - MS, Iguatemi - MS, Alta Floresta - MT, Alto Araguaia - MT e Vale do Rio dos Bois - GO.

Com exceção de Passo Fundo - RS, todos os CILs habilitados em  $\bar{p} = 70$  se repetem em  $\bar{p} = 80$ . Além disso, o número de CILs habilitados com a quantidade mínimo estabelecida sobre para 29. Destes, 17 aparecem no cenário  $\bar{p} = 70$  e os demais seguem listados: Araguaina - TO, Porto Nacional - TO, Ituverava - SP, Andradina - SP, Bauru - SP, Foz do Iguacu - PR, Erechim - RS, Carazinho - RS, Cruz Alta - RS, Santa Maria - RS, Campanha Meridional - RS, Catalao - GO.

Destaca-se a entrada de Cruz Alta - RS neste grupo, microrregião habilitada em todos os cenários e que, em alguns casos, ocupou papel de destaque na atratividade de carga: 6<sup>a</sup> posição em  $\bar{p} = 30$  (6.656.970 t), 10<sup>a</sup> em  $\bar{p} = 40$  (4.708.380 t), 13<sup>a</sup> em  $\bar{p} = 50$  (3.594.970 t) e 16<sup>a</sup> posição em  $\bar{p} = 60$ . Além disso, é o primeiro cenário após  $\bar{p} = 30$  que Brasília volta para o rol das microrregiões indicadas para abertura de CILs.

Os resultados associados a  $\bar{p} = 90$  foram detalhados na Seção 6.1.1 e, por isso, não serão repetidos aqui. De maneira complementar, decidiu-se comparar os resultados caso o limite máximo de abertura de CILs fosse igual a 45 estruturas (ou seja, metade do que é habilitado no cenário referencial) e, ao mesmo tempo, houvesse alteração nos pesos dos termos da função objetivo, considerando três casos: (i) viés econômico ( $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$ ); (ii) cenário referencial ( $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$ ); e (iii) viés ambiental ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ).

Com base na Tabela 6.5, observa-se que os custos totais são similares nos cenários econômico e referencial (variação de 0,008%), enquanto o cenário ambiental apresenta valor 7,8% superior. Esta variação está associada ao custo logístico, uma vez que o custo de emissão dos cenários referencial e ambiental é igual.

Tabela 6.5: Resultados dos cenários econômico, referencial e ambiental considerando  $\bar{p} = 45$

$\alpha$	$\beta$	Volume (t)	Custo logístico (R\$)	Custo com CO <sub>2</sub> (R\$)	Custo total (R\$)
1	0	147.156.890	9.819.826.329,59	784.150.402,62	10.603.976.732,21
0,5	0,5	147.014.880	9.822.245.572,09	780.917.719,23	10.603.163.291,32
0	1	146.069.170	10.653.837.292,15	780.917.719,23	11.434.755.011,38

Embora as quantidades de carga atraídas sejam bem similares, a composição das localizações indicadas para abertura diverge bastante, especialmente entre o cenário com ênfase ambiental ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ) e os demais (conforme Figura 6.23).

O CIL mais relevante nas três situações é Alto Teles Pires - MT, atraindo

11.268.550 t (cenário econômico e referencial) e 9.613.550 t (cenário ambiental). Nos cenários econômico e referencial, os cinco CILs com maior volume de movimentação são os mesmos, na mesma ordem: Alto Teles Pires - MT, Gerais das Balsas - MA, Aripuana - MT e Sudoeste de Goiás - GO. Já no cenário ambiental, o segundo CIL mais relevante é Araraquara - SP (com 8.025.440 t), que movimenta menos de 1.500.000 t nos dois cenários anteriores. Além disso, o quinto colocado é Arapiraca - AL, que não aparece no cenário econômico.

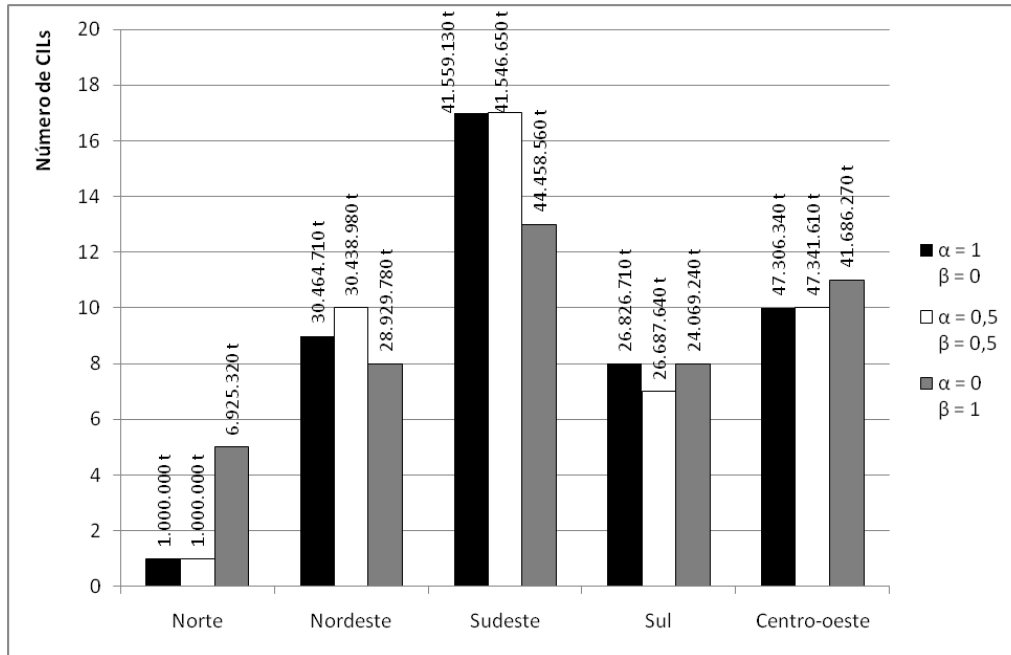


Figura 6.23: Distribuição dos CILs habilitados por região, considerando  $\bar{p} = 45$  e os cenários econômico, referencial e ambiental

De maneira similar ao observado na Seção 6.1.3, os cenários referencial e econômico se comportam de maneira semelhante, divergindo dos resultados ambientais. No entanto, quando se fixa a quantidade máxima de estruturas que podem ser abertas, esta diferenciação entre os CILs no cenário ambiental se torna ainda mais preponderante. As localidades a seguir não foram indicadas para abertura no cenário ambiental: Jau - SP, Londrina - PR, Ribeirão Preto - SP, Maringá - PR, Serrana dos Quilombos - AL, Adamantina - SP, Anápolis - GO, São Joaquim da Barra - MG, Jaboticabal - SP, Mata Meridional Pernambucana - PE, Rodonópolis - MT, Araxá - MG, Ourinhos - SP, Itapeçu Mirim - MA. Verifica-se que 30% das localidades indicadas para abertura em  $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$ ;  $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$  não aparecem no cenário ambiental.

Por sua vez, algumas estruturas foram indicadas para abertura apenas no cenário ambiental ( $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ): Alto Parnaíba Piauiense - PI, Alta Floresta - MT, Presidente Prudente - SP, Apucarana - PR, Araguaína - TO, Ituiutaba - MG, Canoinhas - SC, Rio Formoso - TO, Campo Grande - MS, Norte Araguaia - MS, Dianópolis

- TO, Vilhena - RO, Itapeva - SP, Pelotas - RS. Isso sugere que a regiões ótimas poderiam ser diferentes, caso os custos logístico e de emissão estivessem na mesma magnitude.

Especificamente no que diz respeito às emissões, a Figura 6.24 evidencia que, mesmo que a maior influência nos resultados seja do termo logístico, o aumento no número de facilidades habilitada proporcionou uma redução da quantidade de carbono emitida. Embora não seja alcançado o limite de  $C^{cap}$ , há uma redução de 18% nas emissões, entre  $\bar{p} = 10$  e  $\bar{p} = 90$ .

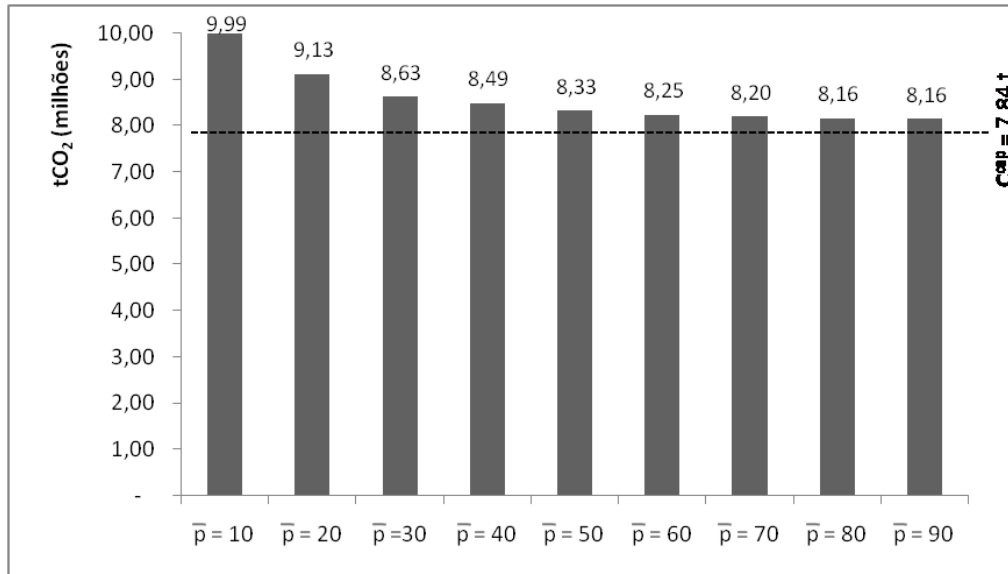


Figura 6.24: Emissão de CO<sub>2</sub> com a variação do número de CILs habilitados

As emissões do cenário  $\bar{p} = 45$  variaram entre as emissões de  $\bar{p} = 40$  e  $\bar{p} = 50$ , sendo 8.429.911,875 t quando  $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$ ; reduzindo para 8.395.159,312 t tanto em  $\alpha = 0,5$  e  $\beta = 0,5$ , quanto em  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ .

Por fim, decidiu-se avaliar o comportamento da rede, caso nenhuma facilidade fosse aberta. Com isso, impôs-se  $\bar{p} = 0$ , mantendo-se os demais parâmetros adotados em  $\bar{p} = 10$ . Observou-se que, caso nenhuma estrutura fosse aberta, o custo total alcançaria R\$ 28,405 bilhões, dos quais 93,1% dizem respeito aos custos logísticos. Este valor é quase 2,8 vezes maior àquele registrado no cenário referencial.

No que concernem às emissões, estas alcançaram o valor de R\$ 1,958 bilhão, o que representam uma emissão total de 21,059 milhões t. Este valor é 2,58 vezes superior à emissão registrada no cenário referencial e 2,68 vezes maior que o  $C^{cap}$  estabelecido nas Seções 6.1.4 e 6.1.5. Dessa maneira, fica claro que a localização de estruturas de integração logística proporcionariam melhorias tanto econômicas quanto ambientais ao caso em estudo.

Vale ressaltar que, dentre os produtos analisados, o açúcar é aquele que tem maior custo logístico médio e maior volume de emissão por tonelada movimentada. Isto



faz sentido, tendo em vista que, embora tenha apenas o terceiro maior volume, suas zonas de produção e consumo são àquelas que estão mais espacialmente dispersas. Para fins de registro, os custos logísticos médios alcançados no cenário  $\bar{p} = 0$  são: R\$ 258,29/t para o açúcar, R\$ 90,55/t para o farelo de soja, R\$ 85,00/t para a soja e R\$ 73,47/t para o milho.

Os valores estão dentro da prática de mercado. De acordo com a SIFRECA (ESALQ-LOG USP, 2019) os valores médios de frete praticados para soja variaram de R\$ 34,1/t a R\$ 179,5/t no período de 29/07/2019 a 04/08/2019. No caso do milho, este valor variou de R\$ 35,9/t a R\$ 176,4/t, enquanto o açúcar registrou de R\$ 49,1/t a R\$ 191,9/t. Não foram encontrados registros que dizem respeito ao farelo de soja.

No que diz respeito às emissões, há um descolamento do açúcar, com 0,193 tCO<sub>2</sub>/t. Os demais, tem emissão semelhante, sendo: 0,073 tCO<sub>2</sub>/t, 0,074 tCO<sub>2</sub>/t e 0,061 tCO<sub>2</sub>/t para soja, farelo de soja e milho, respectivamente. Enfatiza-se que a dispersão das zonas de produção e consumo influencia diretamente nesta diferença observada.

Uma vez discutidos os cenários estabelecidos nas Seções 6.1.1 a 6.1.8, a Seção 6.2 faz um panorama comparativo dos principais resultados alcançados em cada um dos cenários.

## 6.2 Comparação dos cenários

A Tabela 6.6 faz uma comparação no comportamento da rede no que diz respeito ao número de CILs habilitados, volume atraído por estas estruturas, custo logístico, emissão de carbono (em t) e custo total, em relação ao cenário referencial.

Observa-se que, nos casos em que não é imposta uma quantidade máxima de estruturas para abertura, tampouco associado custo a este processo de implantação, a quantidade de CILs abertas varia de 82 a 91, com moda em 90 unidades. Aponta-se que, quando o cenário adota políticas ambientais mais restritivas (seja por meio de peso, taxa ou limitação das emissões), o número de estruturas cai para 82.

Além disso, a variação de volume de carga atraída pelas estruturas também é pequeno, não chegando a 1% na maioria dos casos. Mesmo quando  $\bar{p} = 10$ , a quantidade de carga atraída reduz apenas 10,3%. Nota-se, portanto, que o modelo aloca grande parte do fluxo total nas estruturas de integração, tendo em vista que a intermodalidade promove reduções no custo total da rede (mesmo quando poucas facilidades são abertas).

Tabela 6.6: Comparação dos resultados totais dos diferentes cenários em relação ao referencial

Seção	Matriz emissão	$\alpha$	$\beta$	$C_c$ (R\$)	$C^{cap}$ (t)	$g_k$ (R\$)	$\bar{p}$ (qdt)	CILs abertos	$\Delta$ Volume (%)	$\Delta$ Emissão (%)	$\Delta$ Custo Logístico (%)	$\Delta$ Custo Total (%)
6.1.1	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	90	150.588.490	8.155.240	$9,39 \times 10^9$	$1,02 \times 10^{10}$
6.1.2	Max	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	90	-0,019	58,241	0,011	4,363
	Min	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	90	0,008	-21,177	-0,001	-1,584
	Med	1	0	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	90	-0,007	0,566	-0,017	0,026
6.1.3	Med	0,1	0,9	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	90	-0,338	-2,153	0,620	0,413
	Med	0,2	0,8	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	91	-0,231	-1,559	0,324	0,183
	Med	0,3	0,7	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	91	-0,019	-0,624	0,086	0,033
	Med	0,4	0,6	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	91	-0,019	-0,403	0,046	0,012
	Med	0,6	0,4	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	90	0,008	0,043	-0,003	0,001
	Med	0,7	0,3	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	91	0,008	0,373	-0,014	0,015
	Med	0,8	0,2	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	91	0,008	0,405	-0,015	0,017
	Med	0,9	0,1	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	90	-0,007	0,550	-0,017	0,025
	Med	0	1	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	L	82	-1,083	-3,753	6,633	5,857
	Med	0,5	0,5	0	7849136	1	L	82	-1,083	-3,8	6,562	-1,401
6.1.5	Med	0,5	0,5	93,02	7849136	1	L	82	-1,083	-3,753	6,562	5,791
	Med	0	1	93,02	7849136	1	L	82	-1,083	-3,753	6,648	5,871
	Med	0,5	0,5	1000	$1 \times 10^{20}$	1	L	90	-0,360	-2,244	0,689	71,701
6.1.6	Med	0,5	0,5	5000	$1 \times 10^{20}$	1	L	85	-0,972	-3,345	2,614	383,203
	Med	0,5	0,5	10000	$1 \times 10^{20}$	1	L	84	-0,979	-3,634	4,507	770,892
	Med	0,5	0,5	50000	$1 \times 10^{20}$	1	L	82	-1,065	-3,749	6,452	3864,819
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	$3 \times 10^7$	L	37	-2,982	4,666	6,583	6,440
6.1.7	Med	0,5	0,5	93,02	7849136	$3 \times 10^7$	L	82	-1,083	-3,753	6,562	5,791
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^8$	L	20	-6,652	11,900	15,353	15,095
	Med	0,5	0,5	93,02	7849136	$1 \times 10^8$	L	82	-1,083	-3,753	6,562	5,791
	Med	0,5	0,5	93,02	7849136	$1 \times 10^8$	L	82	-1,083	-3,753	6,562	5,791

Tabela 6.6: Comparação dos resultados totais dos diferentes cenários em relação ao referencial

Seção	Matriz emissão	$\alpha$	$\beta$	$C_c$ (R\$)	$C^{cap}$ (t)	$g_k$ (R\$)	$\bar{p}$ (qdt)	CILs abertos	$\Delta$ Volume (%)	$\Delta$ Emissão (%)	$\Delta$ Custo Logístico (%)	$\Delta$ Custo Total (%)
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	0	0	-100,000	158,237	181,574	179,830
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	10	10	-10,311	22,493	28,698	28,234
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	20	20	-6,613	11,899	15,350	15,092
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	30	30	-3,707	5,873	9,087	8,846
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	40	40	-2,615	4,063	5,739	5,613
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	50	50	-1,768	2,178	3,553	3,450
6.1.8	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	60	60	-0,758	1,103	1,882	1,824
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	70	70	-0,281	0,550	0,773	0,757
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	80	80	-0,053	0,071	0,204	0,194
	Med	0	1	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	45	45	-3,001	-1,848	13,429	12,288
	Med	0,5	0,5	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	45	45	-2,373	2,942	4,576	4,454
	Med	1	0	93,02	$1 \times 10^{20}$	1	45	45	-2,279	3,368	4,550	4,462

Nota: Esclarece-se que na linha do cenário referencial são apresentados os valores brutos encontrados neste caso e, a partir de então, a comparação é feita em termos percentuais.

No que diz respeito às emissões, observa-se claramente o impacto das políticas de carbono. Quanto tais políticas são relaxadas, a emissão chega a ser 11% superior que no cenário referencial. Já quando políticas mais restritivas estão estabelecidas, a redução alcança 3,7%. Ressalta-se que, nos cenários em que há imposição do número de facilidades a serem abertas, o volume de emissão se aproxima do cenário referencial a medida que há uma maior número de estruturas habilitadas: em  $\bar{p} = 10$ , a emissão é 22,49% superior ao cenário referencial, enquanto em  $\bar{p} = 70$  este valor caiu para 0,55%, chegando a 0,053% em  $\bar{p} = 80$ .

O custo logístico, por sua vez, tem um comportamento inverso, sendo maior a medida que políticas de restrição de carbono são avaliadas (chegando a ser 6,65% a mais). No entanto, a maior variação dos custos logísticos se dá quando o número máximo de CILs a ser aberto é pequeno (em  $\bar{p} = 10$  o valor chega a ser 22% superior que no cenário referencial) ou quando se impõe custo de abertura das facilidades igual a R\$ 100 mil, com  $C^{\text{cap}}$  livre.

Por fim, enfatiza-se que a maior diferença é observada quando  $\bar{p} = 0$ , ou seja, nenhuma estrutura é instalada. Como reflexo, o volume de emissões é 158,24% maior que no cenário referencial, enquanto o custo logístico atinge 181,24% e o custo total registra valores 179,83% superiores. Dessa forma, no caso estudado, observa-se que o uso de intermodalidade poderia proporcionar redução dos custos logísticos totais. Para tanto, o CIL tem papel fundamental, enquanto operador logístico responsável pela carga e pelos transbordos entre uma facilidade de integração e o destino final.

Ainda, observa-se que o modelo proposto pode auxiliar no planejamento estratégico governamental do setor de transportes, permitindo, inclusive, avaliar o impacto de diferentes políticas de restrição de carbono a serem adotadas visando contribuir para o alcance das metas estabelecidas em acordos e tratados internacionais.

# Capítulo 7

## Considerações Finais

Com base nas discussões feitas nos Capítulos 1, 2 e 3 foi possível alcançar o objetivo principal desta tese: propor um modelo matemático de localização-alocação de CILs que considere aspectos econômicos e ambientais (Capítulo 4). Inicialmente, apresentou-se um modelo biobjetivo, em que se buscava minimizar os custos logísticos da rede (transporte e operação de um CIL), ao passo que se desejava minimizar a emissão de carbono oriunda do transporte.

A partir do entendimento que ao estabelecer pesos às Funções Objetivos econômica e ambiental seria possível avaliar diferentes ênfases dadas às políticas ambientais durante o planejamento estratégico governamental, o modelo foi transformado em mono-objetivo. Dessa forma, o modelo proposto nesta tese visa minimizar o custo total da rede, que envolve tanto os custos logísticos quanto os custos associados à emissão de CO<sub>2</sub>. Este foi escolhido por ser o mais recorrente nas pesquisas sobre o tema, por ser alvo de tratados internacionais (como o Acordo de Paris) e pelo fato do transporte representar a maior parte das emissões atômicas deste tipo de gás.

Salienta-se que a taxação das emissões estaria aderente à política *carbon tax* já existente em países desenvolvidos. Adicionalmente, fora proposta uma restrição que está relacionada à política *carbon cap*, em que se impõe um limite para a emissão de CO<sub>2</sub>. Enfatiza-se que ao atribuir pesos às dimensões econômica e ambiental na Função Objetivo, permite-se avaliar diferentes importâncias que podem ser atribuídas a cada uma destas dimensões. Cabe ressaltar que Wanke (2015) defende que, ao adotar custos associado à emissão de carbono na Função Objetivo, torna-se possível avaliar os *trade-offs* existentes entre custos logísticos e impactos ambientais.

Assim, o modelo proposto fora aplicado aos parâmetros do Capítulo 5. O Capítulo 6, por sua vez, discorreu sobre a aplicação dos oito cenários propostos. Inicialmente foi avaliado o cenário referencial, em que os pesos dados às dimensões econômica e ambiental eram iguais e apenas a política de restrição de carbono do tipo *carbon tax* estava envolvida. Como resultado, foram abertos 90 CILs a um

custo de R\$ 10,15 bilhões, dos quais 92% são custos logísticos.

Observou-se que, embora este cenário adote pesos idênticos para os termos econômicos e ambientais da Função Objetivo, o termo econômico acaba tendo maior importância na definição da solução ótima em função da diferença de magnitude entre os custos logísticos e de emissão (a diferença chega a ser 54,8 vezes superior no CIL habilitado em Foz do Iguaçu - PR).

Não obstante, o uso dos CILs proporcionou redução das emissões totais da rede: foram emitidas 8,155 milhões t de carbono, no entanto, houve uma economia ambiental de R\$ 175,567 bilhões. Isto significa que o uso da intermodalidade proporcionaria 1,89 bilhões t de emissões evitadas.

Nos cenários otimista e pessimista, por sua vez, habilitou-se a mesma quantidade de estruturas do cenário referencial, inclusive nas mesmas regiões. Isto pode ser explicado pelo fato dos fatores de emissão identificados na literatura terem pouca dispersão em relação à média observada. No entanto, os resultados desta seção trouxeram indicativos acerca do modelo e do caso estudado que motivaram a elaboração de outros cenários. Ao longo da discussão dos dados ficou claro que o modelo matemático proposto tem alta dependência dos parâmetros de entrada; e, que o custo logístico é significativamente maior que o de emissão, o que acaba impactando no resultado (mesmo quando se adotam pesos iguais na Função Objetivo).

No que diz respeito à análise de sensibilidade dos pesos da Função Objetivo, verificou-se que a indicação das microrregiões ótimas nos casos extremos ( $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$ ;  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ) é substancialmente a mesma, embora no cenário ambiental apenas 82 sejam habilitadas (contra 90 facilidades, no econômico e referencial). No entanto, o principal resultado deste cenário diz respeito à composição dos pesos que formam a Função Objetivo proposta.

Observou-se que a partir do momento que há atribuição de qualquer valor diferente de zero ao peso da dimensão econômica, a diferença de magnitude dos custos mencionada no cenário anterior se torna preponderante na definição da quantidade e na localização dos CILs abertos. Não obstante, verifica-se redução na emissão de carbono conforme se aumenta o peso dado à dimensão ambiental, chegando a reduzir em 3,75% o valor de emissões observado no cenário referencial quando  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ . Este percentual de redução se eleva para 4,3% quando comparado com o caso em que há priorização à dimensão econômica ( $\alpha = 1$  e  $\beta = 0$ ).

Em relação ao cenário *carbon cap* ( $C^{cap}$ ), verificou-se que o resultado obtido é muito semelhante ao resultante em  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ , sendo que a indicação das microrregiões permanece a mesma (82 CILs habilitados). Nesta seção, pela primeira vez, discutiu-se que a rede investigada não suportaria reduções bruscas no volume de emissões (mesmo não havendo taxação destas). Assinalou-se que esta política de regulação das emissões, estaria restrita a um  $C^{cap}$  de 7,85 milhões t (valor observado

na seção anterior, quando  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ).

No cenário em que se investigou uma política de *carbon tax* mais restritiva, observou-se que o número de facilidades habilitadas reduziu (ainda que pouco) com o aumento da taxa de carbono. No entanto, observou-se que a emissão total da rede também foi menor: ao considerar um  $C_c$  equivalente a R\$ 10.000, o montante de emissão reduziu a valores bem próximos de  $C^{\text{cap}}$ , embora nenhum limitante tenha sido imposto. No entanto, mesmo com uma taxa equivalente a 50.000 não foi possível reduzir as emissões ao valor estabelecido como  $C^{\text{cap}}$  padrão nos cenários anteriores.

Ressalta-se, como fora discutido na própria seção, que estes valores de  $C_c$  são impraticáveis. Aponta-se, portanto, a existência de um *trade-off* claro entre o custo total da rede e o objetivo de redução das emissões, que se acentua com o aumento da taxa de carbono. Com isso, ratificou-se a discussão dos cenários anteriores: que com os parâmetros adotados no trabalho, mesmo com as intervenções previstas no PNLT, não seria possível aplicar altos percentuais de redução das emissões.

Dessa maneira, além de maior incentivo a intermodalidade (com novas obras de infraestrutura, criação de terminais intermodais etc.), o planejamento estratégico do setor deveria se preocupar, também, com a formulação de políticas públicas (estudos e projetos) que fomentem melhorias tecnológicas e operacionais no setor de transporte (incluindo, aqui, a identificação das melhores práticas).

No que diz respeito ao cenário que considera custos de implantação dos CILs, verificou-se que o número de facilidades abertas reduz drasticamente (chegando a 20 estruturas), quando não é imposto um limite máximo de emissão de carbono (*carbon cap*). Isto porque, ao atribuir custos à abertura de CILs (que nos demais cenários eram simbólicos, ou seja,  $g_k = \text{R\$ } 1,00$ ), ampliou-se ainda mais a diferença entre os custos logísticos (os quais incluem o custo de abertura) e os custos de emissão.

Como resultado, o custo logístico passou a ter papel ainda mais preponderante na definição das regiões ótimas. Como consequência, observou-se que, quanto maior o valor atribuído a  $g_k$ , maior o nível de emissão registrado. Não obstante, ao impor uma limitação associada à emissão de  $\text{CO}_2$ , o número de facilidades habilitadas sobe para 82 (valor observado, por exemplo, no cenário ambiental em que  $\alpha = 0$  e  $\beta = 1$ ).

O último cenário avaliado foi àquele que utiliza uma restrição semelhante ao problema de  $p$ -medianas. Como esperado, os custos totais e o volume de emissão de carbono reduzem a medida que a quantidade de CILs habilitados aumenta. Embora não seja alcançado o limite de  $C^{\text{cap}}$  em nenhum dos valores atribuídos para  $\bar{p}$ , há uma redução de 18% nas emissões, entre  $\bar{p} = 10$  e  $\bar{p} = 90$ .

Por fim, decidiu-se avaliar o comportamento da rede, caso nenhuma facilidade fosse aberta ( $\bar{p} = 0$ ). Observou-se que, caso nenhuma estrutura fosse aberta, o custo total seria quase 2,8 vezes maior àquele registrado no cenário referencial. No que

concernem às emissões, estas alcançaram o valor de 158% superior ao registrado no cenário referencial. Dessa maneira, fica claro que a localização de estruturas de integração logística proporcionariam melhorias tanto econômicas quanto ambientais ao caso em estudo (guardadas as devidas limitações associadas aos pressupostos e parâmetros adotados).

Mais ainda, a partir da análise dos cenários investigados, fica evidente que o modelo matemático proposto pode ser usado como ferramenta de suporte ao planejamento estratégico governamental do setor de transporte, especialmente no que concerne à avaliação de políticas de restrição à emissão de carbono. Assim, ainda que indiretamente, poderia auxiliar na indicação da melhor combinação de políticas públicas visando alcançar metas de redução previstas em acordos nacionais e/ou internacionais.

Como limitações do trabalho, citam-se: (i) a aplicação restrita a apenas quatro produtos da matriz brasileira; (ii) a rede de transporte adotada para movimentar os produtos selecionados não considera alternativas como a cabotagem; (iii) a desatualização dos custos logísticos, ao passo que os custos de emissão estão atualizados - ainda assim observou-se preponderância dos custos logísticos na definição dos custos totais; (iv) a assunção de que os transportes direto e de entrada em um CIL podem ser feitos unicamente a partir do modo rodoviário; (v) o fato dos planos governamentais voltados para o setor de transporte lançados a partir da revisão do PNLT, bem como as recentes atualizações da rede multimodal brasileira (dos últimos quatro anos) não terem sido considerados; e, (vi) o fato de não se considerar a capacidade máxima das redes de transporte (assumindo que, para viabilizar a intermodalidade o governo iria aumentar a capacidade ferroviária, por exemplo, caso fosse necessário).

Dessa maneira, enfatiza-se que os resultados observados estão aderentes apenas à rede investigada, não podendo ser extrapolados, por serem altamente dependentes dos parâmetros de entrada.

Em relação à proposição para novos estudos, sugere-se: (i) incorporar o aspecto social às novas formulações matemáticas; (ii) considerar outros tipos de impactos ambientais; (iii) incorporar a temporalidade ao modelo, que permita um horizonte de planejamento maior; (iv) avaliar a opinião dos especialistas no que diz respeito aos principais impactos econômicos, ambientais e sociais associados a um CIL de maneira a propor modelos sustentáveis; (v) incorporar o comércio de carbono na formulação matemática; (vi) aplicar o modelo a outros grupos de produtos (ou composições maiores); (vii) adotar outras redes de transporte (com combinações que incorporem a cabotagem, para os casos em que isso se aplicar); (viii) revisão dos resultados, considerando a atualização dos dados e da rede (incorporando projetos lançados após o PNLT); (ix) adoção da capacidade das redes de transporte adotadas no estudo; (x) levantamento de ações de melhoria (nos âmbitos governamental e empresarial)



que possam proporcionar reduções nas emissões de carbono, além da avaliação do impacto de tais ações na rede; e, (xi) aplicar técnicas heurísticas e meta-heurísticas para resolver casos em que o tempo computacional para resolução se torna excessivo. Essa questão pode surgir em problemas com mais produtos ou redes mais complexas.

# Referências Bibliográficas

- [1] ABDALLAH, T., FARHAT, A., DIABAT, A., et al. “Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 9, pp. 4271–4285, 2012. ISSN: 0307904X. doi: 10.1016/j.apm.2011.11.056.
- [2] ABNT. “ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura”. 2014. Disponível em: <[www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br)>.
- [3] ACCORSI, R., MANZINI, R., PINI, C., et al. “On the design of closed-loop networks for product life cycle management: Economic, environmental and geography considerations”, *Journal of Transport Geography*, v. 48, pp. 121–134, 2015. ISSN: 09666923. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2015.09.005.
- [4] ADIVAR, B., ATAN, T., OFLAÇ, B. S., et al. “Improving social welfare chain using optimal planning model”, *Supply Chain Management: An International Journal*, v. 15, n. 4, pp. 290 – 305, 2010. doi: 10.1108/13598541011054661.
- [5] AFSHARI, H., SHARAFI, M., ELMEKKAWY, T., et al. “Optimizing multi-objective dynamic facility location decisions within green distribution network design”, *Procedia CIRP*, v. 17, pp. 675–679, 2014. ISSN: 22128271. doi: 10.1016/j.procir.2014.01.147.
- [6] AHMADI-JAVID, A., SEYEDI, P., SYAM, S. S. “A survey of healthcare facility location”, *Computers and Operations Research*, v. 79, pp. 223–263, 2017. ISSN: 03050548. doi: 10.1016/j.cor.2016.05.018.
- [7] ALIDI, A. S. “An integer goal programming model for hazardous waste treatment and disposal”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 16, n. 12, pp. 645–651, 1992. ISSN: 0307904X. doi: 10.1016/0307-904X(92)90097-M.
- [8] ALUMUR, S. A., KARA, B. Y., KARASAN, O. E. “Multimodal hub location and hub network design”, *Omega*, v. 40, n. 6, pp. 927–939, 2012. ISSN: 03050483. doi: 10.1016/j.omega.2012.02.005.

- [9] ALUMUR, S., KARA, B. Y. “Network hub location problems: The state of the art”, *European Journal of Operational Research*, v. 190, n. 1, pp. 1–21, 2008. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2007.06.008.
- [10] AMOUZEGAR, M. A., MOSHIRVAZIRI, K. “Determining optimal pollution control policies: an application of bilevel programming”, *European Journal of Operational Research*, v. 119, n. 1, pp. 100–120, 1999. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00336-1.
- [11] ANSBRO, D., WANG, Q. “A facility location model for socio-environmentally responsible decision-making”, *Journal of Remanufacturing*, v. 3, n. 1, pp. 1, 2013. ISSN: 2210-4690. doi: 10.1186/2210-4690-3-5.
- [12] ANVARI, S., TURKAY, M. “The facility location problem from the perspective of triple bottom line accounting of sustainability”, *International Journal of Production Research*, v. 55, n. 21, pp. 6266–6287, 2017. ISSN: 1366588X. doi: 10.1080/00207543.2017.1341064.
- [13] ARABANI, A. B., FARAHANI, R. Z. “Facility location dynamics: An overview of classifications and applications”, *Computers and Industrial Engineering*, v. 62, n. 1, pp. 408–420, 2012. ISSN: 03608352. doi: 10.1016/j.cie.2011.09.018.
- [14] ATASU, A., TOKTAY, B., YEO, W. M., et al. “Effective Medical Surplus Recovery”, *Production and Operations Management*, v. 26, n. 6, pp. 1142–1162, 2017. ISSN: 19375956. doi: 10.1111/poms.12641.
- [15] BALAMAN, S. Y. *Decision-making for biomass-based production chains: the basic concepts and methodologies*. Elsevier Inc., 2019.
- [16] BAPNA, R., THAKUR, L. S., NAIR, S. K. “Infrastructure development for conversion to environmentally friendly fuel”, *European Journal of Operational Research*, v. 142, n. 3, pp. 480–496, 2002. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/S0377-2217(01)00309-5.
- [17] BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES. *Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil*. 2017. ISBN: 9788587545633. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/14214>>.
- [18] BEASLEY, J., CHU, P. C. “A genetic algorithm for the set covering problem”, *European Journal of Operational Research*, v. 94, n. 2, pp. 392–404, 1996. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/0377-2217(95)00159-X.

- [19] BEKKERING, J., HENGEVELD, E. J., VAN GEMERT, W. J., et al. “Designing a green gas supply to meet regional seasonal demand - An operations research case study”, *Applied Energy*, v. 143, pp. 348–358, 2015. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.034.
- [20] BERGLUND, P. G., KWON, C. “Robust Facility Location Problem for Hazardous Waste Transportation”, *Networks and Spatial Economics*, v. 14, n. 1, pp. 91–116, 2014. ISSN: 15729427. doi: 10.1007/s11067-013-9208-4.
- [21] BETTS, T. K., WIENGARTEN, F., TADISINA, S. K. “Exploring the impact of stakeholder pressure on environmental management strategies at the plant level: What does industry have to do with it?” *Journal of Cleaner Production*, v. 92, pp. 282–294, 2015. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.002.
- [22] BHATTACHARYA, A., KUMAR, S. A., TIWARI, M. K., et al. “An intermodal freight transport system for optimal supply chain logistics”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 38, pp. 73–84, 2014. ISSN: 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2013.10.012.
- [23] BOJARSKI, A. D., LAÍNEZ, J. M., ESPUÑA, A., et al. “Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: An LCA approach”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 33, n. 10, pp. 1747–1759, 2009. ISSN: 00981354. doi: 10.1016/j.compchemeng.2009.04.009.
- [24] BORGATTI, S., EVERETT, M., FREEMAN, L. “Ucinet for Windows: Software for Social Network Analysis. Harvard, MA: Analytic Technologies”. 2002.
- [25] BOUCHERY, Y., FRANSOO, J. “Cost, carbon emissions and modal shift in intermodal network design decisions”, *International Journal of Production Economics*, v. 164, n. December, pp. 388–399, 2014. ISSN: 09255273. doi: 10.1016/j.ijpe.2014.11.017.
- [26] BOZORGIRAD, M. A., ZHANG, H., HAAPALA, K. R., et al. “Environmental impact and cost assessment of incineration and ethanol production as municipal solid waste management strategies”, *Int J Life Cycle Assess*, v. 18, n. 8, pp. 1502–1512, 2013. doi: 10.1007/s11367-013-0587-z.
- [27] BRANDENBURG, M. “Low carbon supply chain configuration for a new product – a goal programming approach”, *International Journal of Produc-*

*tion Research*, v. 7543, n. April, pp. 1–23, 2015. ISSN: 0020-7543. doi: 10.1080/00207543.2015.1005761.

- [28] BRASIL. “Entenda como funciona o mercado de crédito de carbono”. 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/meio-ambiente/2012/04/entenda-como-funciona-o-mercado-de-credito-de-carbono>>.
- [29] BRASIL. “Decreto 99.280/1990 - Dispõe sobre a adesão do Brasil ao Protocolo de Montreal”. 1990. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil/\\_03/decreto/1990-1994/D99280.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil/_03/decreto/1990-1994/D99280.htm)>.
- [30] BRIASSOULIS, H. “Environmental criteria in industrial facility siting decisions: An analysis”, *Environmental Management*, v. 19, n. 2, pp. 297–311, 1995. ISSN: 0364152X. doi: 10.1007/BF02471998.
- [31] CALVERT, K. “Geomatics and bioenergy feasibility assessments: Taking stock and looking forward”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 2, pp. 1117–1124, 2011. ISSN: 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.014.
- [32] CAMPBELL, H. E., PECK, L. R., TSCHUDI, M. K. “Review of Policy Research”, v. 27, n. 1, pp. 1–25, 2010.
- [33] CAMPBELL, J. F. “Theory and Methodology Integer programming formulations of discrete hub location problems”, *European Journal of Operational Research*, v. 72, pp. 387–405, 1994. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/0377-2217(94)90318-2.
- [34] CAMPBELL, J. F., O’KELLY, M. E. “Twenty-Five Years of Hub Location Research”, *Transportation Science*, v. 46, n. 2, pp. 153–169, 2012. ISSN: 0041-1655. doi: 10.1287/trsc.1120.0410.
- [35] CARR, G. L. “Environmental equity : Does it play a role in WTE siting ?” *Journal of Hazardous Materials*, v. 47, pp. 303 – 312, 1996.
- [36] CASTILLO, I., INGOLFSSON, A., SIM, T. “Social optimal location of facilities with fixed servers, stochastic demand, and congestion”, *Production and Operations Management*, v. 18, n. 6, pp. 721–736, 2009. ISSN: 10591478. doi: 10.1111/j.1937-5956.2009.01034.x.
- [37] CEDBS. *Precificação de Carbono na Indústria Brasileira*. Relatório técnico, 2018.

- [38] CEBDS. *Precificação de carbono: o que o setor empresarial precisa saber para se posicionar*. Relatório técnico, 2016.
- [39] CEFIC, ECTA. *Guidelines for Measuring and Managing CO2 Emission from Freight Transport Operations*. Relatório Técnico 1, 2011.
- [40] CHANG, Y.-Y., LIN, C.-Y., CHEN, L.-J. “A Two-Layer Approach for Energy Efficiency in Mobile Location Sensing Applications”. In: *IFIP Networking*, 2012.
- [41] CHASE, N. L., DOMINICK, G. M., TREPAL, A., et al. “”This is public health: Recycling counts!”Description of a pilot health communications campaign”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 6, n. 12, pp. 2980–2991, 2009. ISSN: 16604601. doi: 10.3390/ijerph6122980.
- [42] CHEN, L., OLHAGER, J., TANG, O. “Manufacturing facility location and sustainability: A literature review and research agenda”, *International Journal of Production Economics*, v. 149, n. 149, pp. 154–163, 2014. ISSN: 09255273. doi: 10.1016/j.ijpe.2013.05.013.
- [43] CHEN, X. “The Declining Value of Subscription-based Abstracting and Indexing Services in the New Knowledge Dissemination Era”, *Serials Review*, v. 36, n. 2, pp. 79–85, 2010. ISSN: 00987913. doi: 10.1016/j.serrev.2010.02.010.
- [44] CHIYOSHI, F., GALV, R. D. “A statistical analysis of simulated annealing applied to the p-median problem”, *Annals of Operations Research*, v. 96, pp. 61–74, 2000. ISSN: 02545330. doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018982914742>
- [45] CHOPRA, S., MEINDL, P. *Gestão da Cadeia de Suprimentos - Estratégia, Planejamento e Operações*. Pearson, 2016. ISBN: 9788543004747.
- [46] CICAS, G., HENDRICKSON, C. T., HORVATH, A., et al. “A regional version of a US economic input-output life-cycle assessment model”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 12, n. 6, pp. 365–372, 2007. ISSN: 0948-3349. doi: 10.1007/s11367-007-0318-4.
- [47] CLECAT - EUROPEAN ASSOCIATION FOR FORWARDING, TRANSPORT, L., SERVICES, C. *Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services in accordance with EN 16258 – Terms , Methods*

, *Examples – Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services*. Relatório técnico, 2011.

- [48] CLOQUELL-BALLESTER, V. A., CLOQUELL-BALLESTER, V. A., MONTERDE-DÍAZ, R., et al. “Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment”, *Environmental Impact Assessment Review*, v. 26, n. 1, pp. 79–105, 2006. ISSN: 01959255. doi: 10.1016/j.eiar.2005.06.002.
- [49] CNT. “Custo logístico consome 12,7% do PIB do Brasil”, *Confederação Nacional dos Transportes*, 2016.
- [50] CNT. *Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos*. Relatório técnico, 2017.
- [51] CNT. “PIB do transporte em 2017 volta ao nível de 2010; investimentos caem”, *Confederação Nacional dos Transportes*, 2018.
- [52] CORREA, E. S., STEINER, M. T. A., FREITAS, A. A., et al. “A genetic algorithm for solving a capacitated p-median problem”, *Numerical Algorithms*, v. 35, n. 2-4, pp. 373–388, 2004. ISSN: 10171398. doi: 10.1023/B:NUMA.0000021767.42899.31.
- [53] COSKUN, S., OZGUR, L., POLAT, O., et al. “A Model Proposal for Green Supply Chain Network Design Based On Consumer Segmentation”, *Journal of Cleaner Production*, v. 110, n. January, pp. 149–157, 2016. ISSN: 0959-6526. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.063.
- [54] COSTA, B. B. *Utilização de modelo de localização-alocação para identificação de zoneamento logístico integrado ao planejamento estratégico de transportes*. Tese de Doutorado, 2014.
- [55] COSTA, Y., DUARTE, A., SARACHE, W. “A decisional simulation-optimization framework for sustainable facility location of a biodiesel plant in Colombia”, *Journal of Cleaner Production*, v. 167, pp. 174–191, 2017. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.126.
- [56] CRAINIC, T. G., LAPORTE, G. “Planning models for freight transportation”, *European Journal of Operational Research*, v. 97, n. 3, pp. 409–438, 1997. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/S0377-2217(96)00298-6.
- [57] CUTTER, S. L., HOLM, D., CLARK, L. “The role of geographic scale in monitoring environmental justice”, *Risk Analysis*, v. 16, n. 4, pp. 517–526, 1996. ISSN: 1539-6924. doi: 10.1111/j.1539-6924.1996.tb01097.x.

- [58] VAN DAM, K. H., LUKSZO, Z., FERREIRA, L., et al. “Planning the location of intermodal freight hubs: An agent based approach”, *2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC’07*, , n. April, pp. 187–192, 2007. doi: 10.1109/ICNSC.2007.372774.
- [59] DAO, T. H. D., ZHOU, Y., THILL, J. C., et al. “Spatio-temporal location modeling in a 3D indoor environment: The case of AEDs as emergency medical devices”, *International Journal of Geographical Information Science*, v. 26, n. 3, pp. 469–494, 2012. ISSN: 13658816. doi: 10.1080/13658816.2011.597753.
- [60] DAS, R., SHAW, K. “Uncertain supply chain network design considering carbon footprint and social factors using two-stage approach”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 19, n. 10, pp. 2491–2519, 2017. ISSN: 16189558. doi: 10.1007/s10098-017-1446-6.
- [61] DASKIN, M., SNYDER, L., BERGER, R. “Facility Location in Supply Chain Design”, 2003.
- [62] DE CAMARGO, R. S., MIRANDA, G., LUNA, H. P. “Benders decomposition for the uncapacitated multiple allocation hub location problem”, *Computers and Operations Research*, v. 35, n. 4, pp. 1047–1064, 2008. ISSN: 03050548. doi: 10.1016/j.cor.2006.07.002.
- [63] DIABAT, A., ABDALLAH, T., AL-REFAIE, A., et al. “Strategic Closed-Loop Facility Location Problem”, *IEEE Transactions on Engineering Management*, v. 60, n. 2, pp. 398–408, 2013. ISSN: 00189391. doi: 10.1109/TEM.2012.2211105.
- [64] DIENING, L. “Maximal function on generalized Lebesgue spaces  $L_p(\cdot)$ ”, *Mathematical Inequalities & Applications*, v. 7, n. 4, pp. 245 – 253, 2004.
- [65] DOMBROWSKI, U., RIECHEL, C., DÖRING, H. “Sustainability in Manufacturing Facility Location Decisions : Comparison of Existing Approaches”. In: *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS)*, pp. 246–253, 2014. ISBN: 9783662447352. doi: 10.1007/978-3-662-44736-9\_30.
- [66] DOU, Y., SARKIS, J. “A joint location and outsourcing sustainability analysis for a strategic offshoring decision”, *International Journal of Production Research*, v. 48, n. 2, pp. 567–592, 2010. ISSN: 0020-7543. doi: 10.1080/00207540903175145.



- [67] DUBKE, A. F. *Modelo de localização de terminais especializados : um estudo de caso em corredores de exportação da soja*. Tese de Doutorado, PUC-RJ, 2006.
- [68] ELHEDHLI, S., MERRICK, R. “Green supply chain network design to reduce carbon emissions”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 17, n. 5, pp. 370–379, 2012. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2012.02.002.
- [69] EEA - EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. “GHG emissions of transport”. 2012.
- [70] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. *Balanço Energético Nacional 2018: Relatório Síntese: ano base 2017*. Relatório técnico, 2018.
- [71] EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA S/A - EPL. *Programa de investimentos em logística*. Relatório técnico, 2014.
- [72] EPL. *Relatório Executivo do PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA - PNL 2025*. Relatório técnico, 2018. Disponível em: <<https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl>>.
- [73] ERKUT, E., KARAGIANNIDIS, A., PERKOULIDIS, G., et al. “A multi-criteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece”, *European Journal of Operational Research*, v. 187, n. 3, pp. 1402–1421, 2008. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2006.09.021.
- [74] ERLINKOTTER, D. “A Dual-Based Procedure for Uncapacitated Facility Location”, *Operations Research*, v. 26, n. 6, pp. 992–1009, 1978. ISSN: 0030-364X. doi: 10.1287/opre.26.6.992.
- [75] ESALQ-LOG USP. “Simulador de custo de transporte”. 2019. Disponível em: <<https://sifreca.esalq.usp.br/transporte>>.
- [76] ESKANDARPOUR, M., DEJAX, P., MIEMCZYK, J., et al. “Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review”, *Omega (United Kingdom)*, v. 54, pp. 11–32, 2015. ISSN: 03050483. doi: 10.1016/j.omega.2015.01.006.
- [77] EUROPE UNION. *Report from the Commission to the European Parliament and the Council - Report on the functioning of the European carbon Market*. Relatório técnico, 2017. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/report-functioning-carbon-market{ }en.pdf>>.

- [78] FACCIO, M., PERSONA, A., SGARBOSSA, F., et al. “Sustainable SC through the complete reprocessing of end-of-life products by manufacturers: A traditional versus social responsibility company perspective”, *European Journal of Operational Research*, v. 233, n. 2, pp. 359–373, 2014. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2013.03.027.
- [79] FAHIMNIA, B., JABBARZADEH, A. “Marrying supply chain sustainability and resilience: A match made in heaven”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 91, pp. 306–324, 2016. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2016.02.007.
- [80] FALLER, L. P., DE ALMEIDA, M. I. R. “Planejamento por cenários: preparando pequenas empresas do varejo de móveis planejados para um futuro competitivo”, *Revista de Administração*, v. 49, n. 1, pp. 171–187, 2014. ISSN: 00802107. doi: 10.5700/rausp1139.
- [81] FARAHANI, R. Z., ASGARI, N., HEIDARI, N., et al. “Covering problems in facility location: A review”, *Computers and Industrial Engineering*, v. 62, n. 1, pp. 368–407, 2012. ISSN: 03608352. doi: 10.1016/j.cie.2011.08.020.
- [82] FARAHANI, R. Z., FALLAH, S., RUIZ, R., et al. “OR models in urban service facility location: A critical review of applications and future developments”, *European Journal of Operational Research*, v. 276, n. 1, pp. 1–27, 2019. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2018.07.036.
- [83] FARAHANI, R. Z., HEKMATFAR, M., FAHIMNIA, B., et al. “Hierarchical facility location problem: Models, classifications, techniques, and applications”, *Computers and Industrial Engineering*, v. 68, n. 1, pp. 104–117, 2014. ISSN: 03608352. doi: 10.1016/j.cie.2013.12.005.
- [84] FARAHANI, R. Z., HEKMATFAR, M., ARABANI, A. B., et al. “Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications”, *Computers and Industrial Engineering*, v. 64, n. 4, pp. 1096–1109, 2013. ISSN: 03608352. doi: 10.1016/j.cie.2013.01.012.
- [85] FARAHANI, R. Z., STEADIESEIFI, M., ASGARI, N. “Multiple criteria facility location problems: A survey”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 34, n. 7, pp. 1689–1709, 2010. ISSN: 0307904X. doi: 10.1016/j.apm.2009.10.005.
- [86] FARD, M. M., KIBERT, C. J., CHINI, A. R. “Decision-making for sustainable location of a cement plant in the state of Florida”, *International Journal*

*of Sustainable Engineering*, v. 9, n. 2, pp. 76–92, 2015. ISSN: 19397046. doi: 10.1080/19397038.2015.1050971.

- [87] FAREEDUDDIN, M., HASSAN, A., SYED, M. N., et al. “The impact of carbon policies on closed-loop supply chain network design”, *Procedia CIRP*, v. 26, pp. 335–340, 2015. ISSN: 22128271. doi: 10.1016/j.procir.2014.07.042.
- [88] FEITÓ-CESPÓN, M., SARACHE, W., PIEDRA-JIMENEZ, F., et al. “Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty A case study”, *Journal of Cleaner Production*, v. 151, pp. 206–217, 2017. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.057.
- [89] FEO, T. A., RESENDE, M. G. C. “A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem”, *Operations Research Letters*, v. 8, n. 2, pp. 67–71, 1989. ISSN: 01676377. doi: 10.1016/0167-6377(89)90002-3.
- [90] FIGUEROA, M. J., RIBEIRO, S. K. “Energy for road passenger transport and sustainable development: Assessing policies and goals interactions”, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 5, n. 2, pp. 152–162, 2013. ISSN: 18773435. doi: 10.1016/j.cosust.2013.04.004.
- [91] FLEISCHMANN, M., BEULLENS, P., BLOEMHOF-RUWAARD, J. M., et al. “The impact of product recovery on logistics network design”, *Production and Operations Management*, v. 10, n. 2, pp. 156–173, 2001. ISSN: 10591478 (ISSN). doi: 10.1111/j.1937-5956.2001.tb00076.x.
- [92] FLEISCHMANN, M., KRIKKE, H. R., DEKKER, R., et al. “A characterisation of logistics networks for product recovery”, *Omega*, v. 28, n. 6, pp. 653–666, 2000. ISSN: 03050483. doi: 10.1016/S0305-0483(00)00022-0.
- [93] FLEURY, P. F. “Infraestrutura – sonhos e realidade”. In: Bresser-Pereira, L. C. (Ed.), *O que esperar do Brasil?*, FGV, cap. 12, pp. 297 – 322, 2013.
- [94] FLIEGE, J. “OLAF – A general modeling system to evaluate and optimize the location of an air polluting facility”, *OR Spektrum*, v. 23, n. 1, pp. 117–136, 2001. ISSN: 0171-6468. doi: 10.1007/PL00013342.
- [95] FOX, S. “Moveable factories: How to enable sustainable widespread manufacturing by local people in regions without manufacturing skills and infrastructure”, *Technology in Society*, v. 42, pp. 49–60, 2015. ISSN: 0160791X. doi: 10.1016/j.techsoc.2015.03.003.

- [96] FUNDAÇÃO DOM CABRAL - FDC. *Custos Logísticos no Brasil - 2017*. Relatório técnico, 2018.
- [97] GALVÃO, R. D. “A Dual-Bounded Algorithm for the p-Median Problem”, *Operations Research*, v. 28, n. 5, pp. 1112–1121, 1980.
- [98] GALVÃO, R. D., ESPEJO, L. G. A., BOFFEY, B. “A comparison of Lagrangean and surrogate relaxations for the maximal covering location problem”, *European Journal of Operational Research*, v. 124, n. 2, pp. 377–389, 2000. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/S0377-2217(99)00171-X.
- [99] GALVÃO, R. D., REVELLE, C. “A Lagrangean heuristic for the maximal covering location problem”, *European Journal of Operational Research*, v. 88, n. 1, pp. 114–123, 1996. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/0377-2217(94)00159-6.
- [100] GARG, K., KANNAN, D., DIABAT, A., et al. “A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design”, *Journal of Cleaner Production*, v. 100, pp. 297–314, 2015. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.075.
- [101] GEOFFRION, A. M., GRAVES, G. W. “Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition”, *Management Science*, v. 20, n. 5, pp. 822–844, jan 1974. ISSN: 0025-1909. doi: 10.1287/mnsc.20.5.822.
- [102] GHADDAR, B., NAOUM-SAWAYA, J. “Environmentally friendly facility location with market competition”, *Journal of the Operational Research Society*, v. 63, n. 7, pp. 899–908, 2011. ISSN: 0160-5682. doi: 10.1057/jors.2011.95.
- [103] GHOSH, A., CRAIG, C. S. “A Location Allocation Model for Facility Planning in a Competitive Environment”, *Geographical Analysis*, v. 16, n. 1, pp. 39–51, 1984. ISSN: 15384632. doi: 10.1111/j.1538-4632.1984.tb00799.x.
- [104] GOVINDAN, K., GARG, K., GUPTA, S., et al. “Effect of product recovery and sustainability enhancing indicators on the location selection of manufacturing facility”, *Ecological Indicators*, v. 67, pp. 517–532, 2016. ISSN: 1470160X. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.01.035.
- [105] GREGOLIN, J. Â. R., HOFFMANN, W. A. M., FARIA, L. I. L. D., et al. “Análise da produção científica a partir de indicadores bibliométricos”. In: *Indicadores de ciência, tecnologia e inovação em São Paulo 2004*, pp. 5 – 41, 2005.

- [106] GUIMARÃES, V. A. *Modelagem matemática para localização-alocação de centros de integração logística considerando as demandas par-a-par*. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2015.
- [107] GUIMARÃES, V. A., LEAL JR, I. C. “Performance assessment and evaluation method for passenger transportation : a step toward sustainability”, *Journal of Cleaner Production*, v. 142, pp. 297– 307, 2017.
- [108] GUIMARÃES, V. A., LEAL JUNIOR, I. C., DA SILVA, M. A. V. “Evaluating the sustainability of urban passenger transportation by Monte Carlo simulation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 93, n. April, pp. 732–752, 2018a. ISSN: 18790690. doi: 10.1016/j.rser.2018.05.015.
- [109] GUIMARÃES, V. A., RIBEIRO, G. M., DE AZEVEDO-FERREIRA, M. “Mapping of the Brazilian scientific publication on facility location”, *Pesquisa Operacional*, v. 38, n. 2, pp. 307–330, 2018b. ISSN: 16785142. doi: 10.1590/0101-7438.2018.038.02.0307.
- [110] GUIMARÃES, V. A., MOTTA, G. D. S., ARMOND-DE MELO, D. R., et al. “O Processo de Inovação Brasileiro: Um Estudo De Caso.” In: *Congresso de Administração, Inovação e Sociedade*, pp. 1–16, 2011.
- [111] GUIMARÃES, V. A., RIBEIRO, G. M., DO FORTE, V. L., et al. “Localização-alocação de centros de integração logística submetidos a demandas par-a-par”, *Transportes*, v. 25, n. 1, pp. 51, 2017a. ISSN: 2237-1346. doi: 10.14295/transportes.v25i1.1027.
- [112] GUIMARÃES, V. A., RIBEIRO, G. M., FORTE, V. L., et al. “A location-allocation model for logistics integration centers”, *International Journal of Transport Economics*, v. XLIV, n. 2, pp. 273 – 291, 2017b.
- [113] GUNDOGDU, C. E. “Selection of facility location under environmental damage priority and using ELECTRE method”, *Journal of Environmental Biology*, v. 32, pp. 221 – 226, 2011.
- [114] GUYON, O., ABSI, N., FEILLET, D., et al. “A Modeling Approach for Locating Logistics Platforms for Fast Parcels Delivery in Urban Areas”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 39, pp. 360–368, 2012. ISSN: 18770428. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.03.114.
- [115] HABIBI, F., ASADI, E., SADJADI, S. J., et al. “A multi-objective robust optimization model for site-selection and capacity allocation of municipal solid waste facilities: A case study in Tehran”, *Journal of Cle-*

- aner Production*, v. 166, pp. 816–834, 2017. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.063.
- [116] HAMMAD, A. W. A., AKBARNEZHAD, A., REY, D. “Bilevel Mixed-Integer Linear Programming Model for Solving the Single Airport Location Problem”, v. 31, n. 5, pp. 3–7, 2017. doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000697.
- [117] HAN, J. H., AHN, Y. C., LEE, J. U., et al. “Optimal strategy for carbon capture and storage infrastructure: A review”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, v. 29, n. 8, pp. 975–984, 2012. ISSN: 02561115. doi: 10.1007/s11814-012-0083-3.
- [118] HARRIS, I., MUMFORD, C. L., NAIM, M. M. “A hybrid multi-objective approach to capacitated facility location with flexible store allocation for green logistics modeling”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 66, pp. 1–22, 2014. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2014.01.010.
- [119] HE, L., MAK, H.-Y., RONG, Y., et al. “Service Region Design for Urban Electric Vehicle Sharing Systems”, *Manufacturing & Service Operations Management*, v. 19, n. 2, pp. 309–327, 2017. ISSN: 1523-4614. doi: 10.1287/msom.2016.0611.
- [120] HIGGS, G. “Integrating multi-criteria techniques with geographical information systems in waste facility location to enhance public participation.” *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, v. 24, pp. 105–117, 2006. ISSN: 0734-242X. doi: 10.1177/0734242X06063817.
- [121] HIGGINS, C. D., FERGUSON, M. R. “An Exploration of the Freight Village Concept and its Applicability to Ontario Prepared for the Ontario Ministry of Transportation An Exploration of the Freight Village Concept and its Applicability to Ontario”, , n. October, 2011.
- [122] HUANG, Y., CHEN, C. W., FAN, Y. “Multistage optimization of the supply chains of biofuels”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 46, n. 6, pp. 820–830, 2010. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2010.03.002.
- [123] HUANG, Y., FAN, Y., JOHNSON, N. “Multistage System Planning for Hydrogen Production and Distribution”, *Networks and Spatial Econo-*

*mics*, v. 10, n. 4, pp. 455–472, 2011. ISSN: 1566113X. doi: 10.1007/s11067-009-9119-6.

- [124] HUAWEI. “Disposal and recycling information”. 2019. Disponível em: <<https://consumer.huawei.com/in/support/e-waste-process-policy/>>.
- [125] IBM. “IBM ILOG CPLEX 12.8”. 2017.
- [126] ILOS. *Brochura - Panorama ILOS Custos Logísticos no Brasil*. Relatório técnico, 2014.
- [127] INVESTING.COM. “Carbon Emissions Futures”. 2019. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>.
- [128] ISHFAQ, R., SOX, C. R. “Hub location-allocation in intermodal logistic networks”, *European Journal of Operational Research*, v. 210, n. 2, pp. 213–230, 2011. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2010.09.017.
- [129] ISLAM, M. T., HUDA, N. “Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review”, *Resources, Conservation and Recycling*, v. 137, n. May, pp. 48–75, 2018. ISSN: 18790658. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.05.026.
- [130] ISO. “ISO 14064-1:2018 Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals”. 2018. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/66453.htm>>.
- [131] JAIN, K., VAZIRANI, V. V. “Approximation algorithms for metric facility location and k-Median problems using the primal-dual schema and Lagrangian relaxation”, *Journal of the ACM*, v. 48, n. 2, pp. 274–296, 2001. ISSN: 00045411. doi: 10.1145/375827.375845.
- [132] JEONG, J. S., RAMÍREZ-GÓMEZ, Á. “A multicriteria GIS-based assessment to optimize biomass facility sites with parallel environment - A case study in Spain”, *Energies*, v. 10, n. 12, 2017. ISSN: 19961073. doi: 10.3390/en10122095.
- [133] JINDAL, A., SANGWAN, K. S. “Multi-objective fuzzy mathematical modeling of closed-loop supply chain considering economical and environmental factors”, *Annals of Operations Research*, v. 257, n. 1-2, pp. 95–120, 2017. ISSN: 15729338. doi: 10.1007/s10479-016-2219-z.

- [134] KARIV, O., HAKIMI, S. L. “An algorithmic approach to network location problems. I: the p-centers”, *SIAM J. APPL. Math.*, v. 37, n. 3, pp. 513–538, 1979.
- [135] KITAMURA, R., SAKAMOTO, K., WAYGOOD, O. “Declining sustainability: The case of shopping trip energy consumption”, *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 2, n. 3, pp. 158–176, 2008. ISSN: 15568318. doi: 10.1080/15568310701517307.
- [136] KIZILBOGA, G., MANDIL, G., GENEVOIS, M. E., et al. “Remanufacturing network design modeling: A case of diesel particulate filter”, *Procedia CIRP*, v. 11, pp. 163–168, 2013. ISSN: 22128271. doi: 10.1016/j.procir.2013.07.048.
- [137] KLOSE, A., DREXL, A. “Facility location models for distribution system design”, *European Journal of Operational Research*, v. 162, n. 1, pp. 4–29, 2005. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2003.10.031.
- [138] KOVAČIĆ, D., BOGATAJ, M. “Reverse logistics facility location using cyclical model of extended MRP theory”, *Central European Journal of Operations Research*, v. 21, n. SUPPL1, pp. 41–57, 2013. ISSN: 1435246X. doi: 10.1007/s10100-012-0251-x.
- [139] KRAMERS, A., NYBERG, M., HÖJER, M. “Work hubs location considerations and opportunities for reduced travel”. In: *29th International Conference on Informatics for Environmental Protection (EnviroInfo 2015) Third International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S 2015) Work*, n. EnviroInfo, pp. 126–135, 2015. doi: 10.2991/ict4s-env-15.2015.15.
- [140] KUBY, M. J., MIDDLETON, R. S., BIELICKI, J. M. “Analysis of cost savings from networking pipelines in CCS infrastructure systems”, *Energy Procedia*, v. 4, pp. 2808–2815, 2011. ISSN: 18766102. doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.185.
- [141] LAÍNEZ, J. M., BOJARSKI, A., ESPUÑA, A., et al. “Mapping environmental issues within supply chains: a LCA based approach”, *Computer Aided Chemical Engineering*, v. 25, pp. 1131–1136, 2008. ISSN: 15707946. doi: 10.1016/S1570-7946(08)80195-2.
- [142] LARUMBE, F., SANZO, B. “Cloptimus: A multi-objective Cloud data center and software component location framework”. In: *2012 1st IEEE International Conference on Cloud Networking, CLOUDNET 2012 - Procee-*



- dings*, pp. 23–28, 2012. ISBN: 9781467327985. doi: 10.1109/CloudNet.2012.6483649.
- [143] LEAL JR, I. C. *Método de escolha modal para transporte de produtos perigosos com base em medidas de ecoeficiência*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2010.
- [144] LI, J.-Q. “Transit Bus Scheduling with Limited Energy”, *Transportation Science*, v. 48, n. 4, pp. 521–539, 2014. ISSN: 1526-5447. doi: 10.1287/trsc.1090.0306.
- [145] LI, Q., JIA, H., LI, H., et al. “Locating a Vehicle Return Center via Artificial Fish Swarm Algorithm”. In: *Conference: 2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2016)*, 2016.
- [146] LIQIANG, H., GUOXIN, W. “Two-stage Stochastic Model for Petroleum Supply Chain from the Perspective of Carbon Emission”, *Proceedings of the International Conference on Logistics, Engineering, Management and Computer Science (Lemcs 2015)*, v. 117, n. Lemcs, pp. 926–930, 2015.
- [147] LITMAN, T. “Well Measured: Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning”, *Victoria Transport Policy Institute*, pp. 10–15, 2015.
- [148] LITMAN, T., BURWELL, D. “Issues in sustainable transportation”, *International Journal of Global Environmental Issues*, v. 6, n. 4, pp. 331–347, 2006. ISSN: 1466-6650. doi: 10.1504/IJGENVI.2006.010889.
- [149] LIU, C., GUI, Q. “Mapping intellectual structures and dynamics of transport geography research: a scientometric overview from 1982 to 2014”, *Scientometrics*, v. 109, n. 1, pp. 159–184, 2016. ISSN: 15882861. doi: 10.1007/s11192-016-2045-8.
- [150] LOIOLA, E. M., DE ABREU, N. M. M., BOAVENTURA-NETTO, P. O., et al. “A survey for the quadratic assignment problem”, *European Journal of Operational Research*, v. 176, n. 2, pp. 657–690, 2007. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2005.09.032.
- [151] LOMBARDI, P., FERRETTI, V. “New spatial decision support systems for sustainable urban and regional development”, *Smart and Sustainable Built Environment*, v. 4, n. 1, pp. 45 – 66, 2015. ISSN: 20466102. doi: 10.1108/SASBE-07-2016-0015.

- [152] LORENA, L. A. N., SENNE, E. L. F. “A column generation approach to capacitated p-median problems”, *Computers and Operations Research*, v. 31, n. 6, pp. 863–876, 2004. ISSN: 03050548. doi: 10.1016/S0305-0548(03)00039-X.
- [153] LORENA, L. A. N., LOPES, F. B. “A surrogate heuristic for set covering problems”, *European Journal of Operational Research*, v. 79, n. 1, pp. 138–150, 1994. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/0377-2217(94)90401-4.
- [154] LORENA, L. A. N., FURTADO, J. C. “Constructive Genetic Algorithm for Clustering Problems”, *Evolutionary Computation*, v. 9, n. 3, pp. 309–327, 2001. ISSN: 1063-6560. doi: 10.1162/106365601750406019.
- [155] MACHARIS, C., BONTEKONING, Y. M. “Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review”, *European Journal of Operational Research*, v. 153, n. 2, pp. 400–416, 2004. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/S0377-2217(03)00161-9.
- [156] MAK, H. H.-Y., RONG, Y., SHEN, Z.-J. M. Z. “Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping”, *Management Science*, v. 59, n. 7, pp. 1557–1575, 2013. ISSN: 0025-1909. doi: 10.1287/mnsc.1120.1672.
- [157] MANZINI, R., ACCORSI, R. “The new conceptual framework for food supply chain assessment”, *Journal of Food Engineering*, v. 115, n. 2, pp. 251–263, 2013. ISSN: 02608774. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.10.026.
- [158] MARTÍ, R., RESENDE, M. G., RIBEIRO, C. C. “Multi-start methods for combinatorial optimization”, *European Journal of Operational Research*, v. 226, n. 1, pp. 1–8, 2013. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2012.10.012.
- [159] MEISEL, F., KIRSCHSTEIN, T., BIERWIRTH, C. “Integrated production and intermodal transportation planning in large scale production-distribution-networks”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 60, pp. 62–78, 2013. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2013.10.003.
- [160] MELO, M. T., NICKEL, S., SALDANHA-DA GAMA, F. “Facility location and supply chain management - A review”, *European Journal of Operational Research*, v. 196, n. 2, pp. 401–412, 2009. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2008.05.007.

- [161] MENDES, N. C., BUENO, C., OMETTO, A. R. “Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos”, *Production*, v. 26, n. 1, pp. 160–175, 2016. ISSN: 1980-5411. doi: 10.1590/0103-6513.153213.
- [162] MENEGHETTI, A., MONTI, L. “Greening the food supply chain: An optimisation model for sustainable design of refrigerated automated warehouses”, *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 21, pp. 6567–6587, 2015. ISSN: 0020-7543. doi: 10.1080/00207543.2014.985449.
- [163] MILLER, B., SPERTUS, J., KAMGA, C. “Costs and benefits of pneumatic collection in three specific New York City cases”, *Waste Management*, v. 34, n. 11, pp. 1957–1966, 2014. ISSN: 18792456. doi: 10.1016/j.wasman.2014.06.008.
- [164] MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. “Acordo de Paris”. 2019. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>.
- [165] MOHAMMADI, M., TORABI, S. A., TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. “Sustainable hub location under mixed uncertainty”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 62, n. February, pp. 89–115, 2014. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2013.12.005.
- [166] MOTA, B., CARVALHO, A., BARBOSA-POVOA, A., et al. “Green supply chain design and planning”, *2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (Iesm)*, , n. October, pp. 537–545, 2015. doi: 10.1109/IESM.2015.7380210.
- [167] MOTA, B., CARVALHO, A., ISABEL, M., et al. “Supply chain design and planning accounting for the Triple Bottom Line”. In: *12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 2015a.
- [168] MOTA, B., GOMES, M. I., BARBOSA-POVOA, A. P. “Supply chain design towards sustainability. accounting for growth and jobs”, *Computer Aided Chemical Engineering*, v. 34, pp. 789–794, 2014. ISSN: 15707946. doi: 10.1016/B978-0-444-63433-7.50116-4.
- [169] MOTTA, G. D. S., QUINTELLA, R. H. “Assessment of non-financial criteria in the selection of investment projects for seed capital funding: The contribution of scientometrics and patentometrics”, *Journal of Technology Management and Innovation*, v. 7, n. 3, pp. 172–193, 2012. ISSN: 07182724.

- [170] MT - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. *Projeto de reavaliação de estimativas e metas do PNLT: Relatório Final*. Relatório técnico, Brasília, 2012.
- [171] MT - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. *Plano Nacional de Logística e Transportes: Sumário executivo*. Relatório técnico, Brasília, 2007.
- [172] MT - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. *Relatório Executivo PNLT*. Relatório técnico, 2009.
- [173] MT - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. *Estudos e Pesquisas para Desenvolvimento de Metodologia para Implementação de Centros de Integração Logística – CIL*. Relatório técnico, 2016. Disponível em: <<http://portaldaestrategia.transportes.gov.br/index.php/component/content/article?id=295>>.
- [174] MT - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. *Programa de Aceleração do Crescimento: Ações do Ministério dos Transportes*. Relatório técnico, 2013.
- [175] MT - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. *9º Balanço do PAC 2*. Relatório técnico, 2014.
- [176] MUSAVI, M. M., BOZORGI-AMIRI, A. “A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain”, *Computers and Industrial Engineering*, v. 113, pp. 766–778, 2017. ISSN: 03608352. doi: 10.1016/j.cie.2017.07.039.
- [177] NAGY, G., SALHI, S. “Location-routing: Issues, models and methods”, *European Journal of Operational Research*, v. 177, n. 2, pp. 649–672, 2006. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2006.04.004.
- [178] NEMA, A. K., GUPTA, S. K. “Optimization of regional hazardous waste management systems : an improved formulation”, v. 19, pp. 441–451, 1999.
- [179] NEUMÜLLER, C., KELLNER, F., GUPTA, J. N., et al. “Integrating three-dimensional sustainability in distribution centre selection: The process analysis method-based analytic network process”, *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 2, pp. 409–434, 2015. ISSN: 1366588X. doi: 10.1080/00207543.2014.939241.
- [180] NGUYEN, T. T., OLAPIRIYAKUL, S. “Optimizing Facility Location Decisions Considering Health Impact on Local Population”, *Procedia CIRP*,

- v. 40, pp. 289–294, 2016. ISSN: 22128271. doi: 10.1016/j.procir.2016.01.124.
- [181] NIKANDER, S. *Greenhouse gas and energy intensity of product chain: case transport biofuel*. Tese de Doutorado, 2008.
- [182] NIKNAMFAR, A. H., NIAKI, S. T. A. “Fair profit contract for a carrier collaboration framework in a green hub network under soft time-windows: Dual lexicographic max-min approach”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 91, pp. 129–151, 2016. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2016.04.006.
- [183] OLAPIRIYAKUL, S. “Designing a sustainable municipal solid waste management system in Pathum Thani, Thailand”, *International Journal of Environmental Technology and Management*, v. 20, n. 1/2, pp. 37, 2017. ISSN: 1466-2132. doi: 10.1504/IJETM.2017.086433.
- [184] OMAR, S., OTHMAN, N. A. “The Effects of Stakeholder Pressure on Eco-Innovation Practices in Malaysian Chemical Industry”, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 10, n. 7, pp. 34–40, 2016.
- [185] ORTIZ-ASTORQUIZA, C., CONTRERAS, I., LAPORTE, G. “Multi-level facility location problems”, *European Journal of Operational Research*, v. 267, n. 3, pp. 791–805, 2018. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.019.
- [186] OSMANI, A., ZHANG, J. “Stochastic optimization of a multi-feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain under multiple uncertainties”, *Energy*, v. 59, pp. 157–172, 2013. ISSN: 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2013.07.043.
- [187] OTTEN, M., HOEN, M. T., DEN BOER, E. *STREAM Freight transport 2016 - Emissions of freight transport modes*. Relatório técnico, 2016. Disponível em: <[http://www.cedelft.eu/publicatie/stream\\_{\\_}freight\\_{\\_}transport\\_{\\_}2016\\_{\\_}/1855](http://www.cedelft.eu/publicatie/stream_{_}freight_{_}transport_{_}2016_{_}/1855)>.
- [188] OWEN, S. H., DASKIN, M. S. “Strategic facility location: A review”, *European Journal of Operational Research*, v. 111, n. 3, pp. 423–447, 1998. ISSN: 03772217. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00186-6.
- [189] PANICHELLI, L., GNANSOUNOU, E. “GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on

- marginal delivery costs and resources competition between facilities”, *Biomass and Bioenergy*, v. 32, n. 4, pp. 289–300, 2008. ISSN: 09619534. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.10.008.
- [190] PATI, R. K., VRAT, P., KUMAR, P. “A goal programming model for paper recycling system”, *Omega*, v. 36, n. 3, pp. 405–417, 2008. ISSN: 03050483. doi: 10.1016/j.omega.2006.04.014.
- [191] PERERA, P. K. P., LAM, N. “An environmental justice assessment of the mississippi river industrial corridor in Louisiana, U.S. using a gis-based approach”, *Applied Ecology and Environmental Research*, v. 11, n. 4, pp. 681–697, 2013. ISSN: 15891623.
- [192] PÉREZ, A. T. E., CARMARGO, M., RINCÓN, P. C. N., et al. “Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 69, n. September 2016, pp. 350–359, 2017. ISSN: 18790690. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.084.
- [193] QI, W., LIANG, Y., SHEN, Z.-J. M. “Joint Planning of Energy Storage and Transmission for Wind Energy Generation”, *Operations Research*, v. 63, n. 6, pp. 1280–1293, 2015. ISSN: 0030-364X. doi: 10.1287/opre.2015.1444.
- [194] QUADROS, S. G. R., NASSI, C. D. “An evaluation on the criteria to prioritize transportation infrastructure investments in Brazil”, *Transport Policy*, v. 40, pp. 8–16, 2015. ISSN: 1879-310X. doi: 10.1016/j.tranpol.2015.02.002.
- [195] RAO, C., GOH, M., ZHAO, Y., et al. “Location selection of city logistics centers under sustainability”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 36, pp. 29–44, 2015. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2015.02.008.
- [196] REVELLE, C. S., SWAIN, R. W. “Central facilities location”, *Geographical Analysis*, v. 2, n. 1, pp. 30–42, 1970. ISSN: 00167363. doi: 10.1111/j.1538-4632.1970.tb00142.x.
- [197] ROMERO, N., NOZICK, L. K., XU, N. “Hazmat facility location and routing analysis with explicit consideration of equity using the Gini coefficient”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 89, pp. 165–181, 2016. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2016.02.008.

- [198] DE ROSA, V., GEBHARD, M., HARTMANN, E., et al. “Robust sustainable bi-directional logistics network design under uncertainty”, *International Journal of Production Economics*, v. 145, n. 1, pp. 184–198, 2013. ISSN: 09255273. doi: 10.1016/j.ijpe.2013.04.033.
- [199] SANCHEZ, D. L., CALLAWAY, D. S. “Optimal scale of carbon-negative energy facilities”, *Applied Energy*, v. 170, pp. 437–444, 2016. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.134.
- [200] SANTIBAÑEZ-AGUILAR, J. E., GONZÁLEZ-CAMPOS, J. B., PONCE-ORTEGA, J. M., et al. “Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives”, *Journal of Cleaner Production*, v. 65, pp. 270–294, 2014. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.08.004.
- [201] SANTOS, A. S., RIBEIRO, S. K. “The use of sustainability indicators in urban passenger transport during the decision-making process : the case of Rio de Janeiro , Brazil”, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 5, n. 2, pp. 251–260, 2013. ISSN: 1877-3435. doi: 10.1016/j.cosust.2013.04.010.
- [202] SECRETARIA DE PORTOS - SEP. *Plano Nacional de Logística Portuária – Planos Mestres*. Relatório técnico, 2012.
- [203] SEDEHZADEH, S., TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R., BABOLI, A., et al. “Optimization of a multi-modal tree hub location network with transportation energy consumption: A fuzzy approach”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, v. 30, n. 1, pp. 43–60, 2016. ISSN: 18758967. doi: 10.3233/IFS-151709.
- [204] SEPÚLVEDA, J. M., BANGUERA, L. A. “A MODEL FOR DESIGN OF A REVERSE LOGISTICS NETWORK UNDER EXTENDED”. In: *24th International Conference on Production Research (ICPR 2017)*, pp. 38–43, 2017. ISBN: 9781605955070.
- [205] SHAW, K., IRFAN, M., SHANKAR, R., et al. “Low carbon chance constrained supply chain network design problem: a Benders decomposition based approach”, *Computers and Industrial Engineering*, v. 98, pp. 483–497, 2016. ISSN: 03608352. doi: 10.1016/j.cie.2016.06.011.
- [206] SHEHORY, O., KRAUS, S. “Methods for task allocation via agent coalition formation”, *Artificial Intelligence*, v. 101, n. 1-2, pp. 165–200, 1998. ISSN: 00043702. doi: 10.1016/S0004-3702(98)00045-9.

- [207] SHUKLA, A., PEKNY, J., VENKATASUBRAMANIAN, V. “An optimization framework for cost effective design of refueling station infrastructure for alternative fuel vehicles”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 35, n. 8, pp. 1431–1438, 2011. ISSN: 00981354. doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.03.018.
- [208] SILVA, M. R., CUNHA, C. B. “New simple and efficient heuristics for the uncapacitated single allocation hub location problem”, *Computers and Operations Research*, v. 36, n. 12, pp. 3152–3165, 2009. ISSN: 03050548. doi: 10.1016/j.cor.2008.12.019.
- [209] SIRIKIJPANICHKUL, A., FERREIRA, L. “Multi-Objective Evaluation of Intermodal Freight Terminal Location Decisions”, *Proceedings of the 27th Conference of Australian Institute of Transport Research (CAITR)*, , n. December, pp. 7–9, 2005.
- [210] SMITH, N. R., MANZANO, M. G., CASTILLO-VILLAR, K., et al. “A bi-objective model for local and global green supply chain”, *2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Production and Logistics Systems (CIPLS)*, pp. 83–90, 2014. doi: 10.1109/CIPLS.2014.7007165.
- [211] DE SOUZA, A. L. R., ALVAREZ, G., ANDRADE, J. C. S. “Mercado regulado de carbono no Brasil: um ensaio sobre divergências contábil e tributária dos créditos de carbono”, *Organizações & Sociedade*, v. 20, n. 67, pp. 675–697, 2013.
- [212] DE SOUZA, Â. R. L., BOUCHUT, M. C. L. “Custos logísticos no Brasil: avaliação do desempenho logístico brasileiro no comércio internacional na última década (2007-2016)”. In: *XXIV Congresso Brasileiro de Custos*, 2017.
- [213] SPNT - SECRETARIA DE POLÍTICA NACIONAL DE TRANSPORTES. *Estudos e pesquisas para desenvolvimento de metodologia para implementação de centros de integração logística com vistas a subsidiar políticas públicas voltadas à promoção da intermodalidade no transporte de cargas*. Relatório técnico, 2016. Disponível em: <<http://portaldaestrategia.transportes.gov.br/index.php/component/content/article?id=295>>.
- [214] SWERSEY, A. J., THAKUR, L. S. “An Integer Programming Model for Locating Vehicle Emissions Testing Stations.” *Management Science*, v. 41, n. 3, pp. 496–513, 1995. ISSN: 00251909. doi: 10.1287/mnsc.41.3.496.



- [215] TALAEI, M., FARHANG MOGHADDAM, B., PISHVAEE, M. S., et al. “A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: A numerical illustration in electronics industry”, *Journal of Cleaner Production*, v. 113, pp. 662–673, 2016. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.074.
- [216] TANG, X., ZHANG, J. “The multi-objective capacitated facility location problem for green logistics”. In: *2015 4th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport, IEEE ICALT 2015*, pp. 163–168, 2015. ISBN: 9781479984008. doi: 10.1109/ICAdLT.2015.7136594.
- [217] TANIGUCHI, E., THOMPSON, R. G., YAMADA, T. “Recent Trends and Innovations in Modelling City Logistics”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 125, pp. 4–14, 2014. ISSN: 18770428. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.01.1451.
- [218] TAVARES, G., ZSIGRAIOVÁ, Z., SEMIAO, V. “Multi-criteria GIS-based siting of an incineration plant for municipal solid waste”, *Waste Management*, v. 31, n. 9-10, pp. 1960–1972, 2011. ISSN: 0956053X. doi: 10.1016/j.wasman.2011.04.013.
- [219] TEMUR, G. T., BOLAT, B. “Evaluating efforts to build sustainable WEEE reverse logistics network design: comparison of regulatory and non-regulatory approaches”, *International Journal of Sustainable Engineering*, v. 10, n. 6, pp. 358–383, 2017. ISSN: 19397046. doi: 10.1080/19397038.2017.1379572.
- [220] THE VANTAGE POINT. “Software Vantage Point Version 9 - Search Technology Inc”. 2016. Disponível em: <<https://www.thevantagepoint.com/>>.
- [221] THOMSON REUTERS. “Web of Science™ Todas as bases de dados”. 2016.
- [222] TIAN, G., LIU, Y. “Energy-efficient models of sustainable location for a vehicle inspection station with emission constraints”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 12, n. 1, pp. 238–243, 2015. ISSN: 15455955. doi: 10.1109/TASE.2014.2360673.
- [223] TÓFFANO, R., NAZARETH, V. S., RIBEIRO, G. M., et al. “Uma Metodologia para Determinação de Arenas mais Sustentáveis Baseada no Problema de Cobertura de Conjuntos”, *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 5, n. 2, pp. 49–63, 2016. ISSN: 23169834. doi: 10.5585/geas.v5i2.375.

- [224] TREITL, S., NOLZ, P. C., JAMMERNEGG, W. “Incorporating environmental aspects in an inventory routing problem. A case study from the petrochemical industry”, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, v. 26, n. 1-2, pp. 143–169, 2014. ISSN: 19366582. doi: 10.1007/s10696-012-9158-z.
- [225] ULUKAN, Z., DEMIRCIOĞLU, E. “A Survey of Discrete Facility Location Problems”, *International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*, v. 9, n. 7, pp. 2450–2455, 2015.
- [226] UNITED NATIONS - CLIMATE CHANGE. “What is the Kyoto Protocol?” 2019. Disponível em: <<https://unfccc.int/kyoto{ }protocol>>.
- [227] UNITED NATIONS - DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. “Sustainable Transport”. 2015.
- [228] UNITED NATIONS. *Methodological tool: Baseline emissions for modal shift measures in inter-urban passenger transport*. Relatório técnico, 2014.
- [229] UOL. “Câmbio - Euro”. 2019. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/euro-uniao-europeia/>>.
- [230] VARSEI, M., POLYAKOVSKIY, S. “Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in Australia”, *Omega (United Kingdom)*, v. 66, n. September, pp. 236–247, 2017. ISSN: 03050483. doi: 10.1016/j.omega.2015.11.009.
- [231] VARSEI, M., SOOSAY, C., FAHIMNIA, B., et al. “Framing sustainability performance of supply chains with multidimensional indicators”, *Supply Chain Management*, v. 19, n. 3, pp. 242–257, 2014. ISSN: 13598546. doi: 10.1108/SCM-12-2013-0436.
- [232] VERMA, M., GENDREAU, M., LAPORTE, G. “Optimal location and capability of oil-spill response facilities for the south coast of Newfoundland”, *Omega*, v. 41, n. 5, pp. 856–867, 2013. ISSN: 0305-0483. doi: 10.1016/j.omega.2012.10.007.
- [233] WANG, Y., LU, T., GAO, C., et al. “Research on Remanufacturing Closed-loop Logistics Network Design under Low-carbon Restriction”, *Advanced Manufacturing Technology and Systems*, v. 159, pp. 224–234, 2012. ISSN: 1660-9336. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.159.224.
- [234] WANG, Y., ZHU, X., LU, T., et al. “Eco-efficient based logistics network design in hybrid manufacturing/ remanufacturing system in low-carbon

- economy”, *Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 6, n. 1 LISS 2012, pp. 200–214, 2013. ISSN: 20138423. doi: 10.3926/jiem.665.
- [235] WANKE, P., CORREA, H., JACOB, J., et al. “Including carbon emissions in the planning of logistic networks: a Brazilian case”, *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, v. 7, n. 6, pp. 655, 2015. ISSN: 1756-6517. doi: 10.1504/IJSTL.2015.072681.
- [236] WBCSD, W. B. C. F. S. D. *Eco-efficiency: learning module*. Relatório Técnico January, 2006.
- [237] WCED. *Report of the World Commission on Environment and Development : Our Common Future Acronyms and Note on Terminology Chairman ’ s Foreword*. Relatório técnico, 1987.
- [238] WENG, H. H. R., CHEN, J. S., CHEN, P. C. “Effects of green innovation on environmental and corporate performance: A stakeholder perspective”, *Sustainability (Switzerland)*, v. 7, n. 5, pp. 4997–5026, 2015. ISSN: 20711050. doi: 10.3390/su7054997.
- [239] WORD CLOUD. “Available at: <<https://wordart.com/create>>”. 2018.
- [240] WORLD BANK. “Global rankings 2018 - Logistic Performance”. 2018. Disponível em: <<https://lpi.worldbank.org/international/global>>.
- [241] WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE, WBCSD, W. B. C. F. S. D. *CCS Guidelines Guidelines for Carbon Dioxide Capture, Transport, and Storage*. 2008. ISBN: 9781569737019. doi: 20113082154. Disponível em: <<http://pdf.wri.org/ccs{ }guidelines.pdf>>.
- [242] WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE, WBSCD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. “Measuring to Manage: A Guide to Designing GHG Accounting and Reporting Programs”, *The Greenhouse Gas Protocol*, 2007.
- [243] WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE, WBSCD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *GHG Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Relatório técnico, 2004.
- [244] XIFENG, T., JI, Z., PENG, X. “A multi-objective optimization model for sustainable logistics facility location”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 22, n. July 2013, pp. 45–48, 2013. ISSN: 13619209. doi: 10.1016/j.trd.2013.03.003.

- [245] YADAV, V., KARMAKAR, S., DIKSHIT, A. K., et al. “A feasibility study for the locations of waste transfer stations in urban centers: A case study on the city of Nashik, India”, *Journal of Cleaner Production*, v. 126, n. September, pp. 191–205, 2016. ISSN: 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.017.
- [246] YANIK, S., SÜRER, Ö., ÖZTAYŞI, B. “Designing sustainable energy regions using genetic algorithms and location-allocation approach”, *Energy*, v. 97, pp. 161–172, 2016. ISSN: 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2015.12.116.
- [247] YOU, F., TAO, L., GRAZIANO, D. J., et al. “Optimal Design of Sustainable Cellulosic Biofuel Supply Chains: Multiobjective Optimization Coupled with Life Cycle Assessment and Input–Output Analysis”, *AIChE Journal*, v. 58, n. 4, pp. 1157–1180, 2012. ISSN: 14746670. doi: 10.1002/aic.
- [248] YU, H., SOLVANG, W. D. “A stochastic programming approach with improved multi-criteria scenario-based solution method for sustainable reverse logistics design of waste electrical and electronic equipment (WEEE)”, *Sustainability (Switzerland)*, v. 8, n. 12, 2016. ISSN: 20711050. doi: 10.3390/su8121331.
- [249] ZHALECHIAN, M., TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R., ZAHIRI, B., et al. “Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 89, pp. 182–214, 2016. ISSN: 13665545. doi: 10.1016/j.tre.2016.02.011.
- [250] ZHANG, D., LI, X., HUANG, Y., et al. “A robust optimization model for green regional logistics network design with uncertainty in future logistics demand”, *Advances in Mechanical Engineering*, v. 7, n. 12, pp. 1687814015620518, 2015. ISSN: 1687-8140. doi: 10.1177/1687814015620518.
- [251] ZHANG, F., JOHNSON, D. M., JOHNSON, M. A. “Development of a simulation model of biomass supply chain for biofuel production”, *Renewable Energy*, v. 44, pp. 380–391, 2012. ISSN: 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2012.02.006.
- [252] ZHANG, J., OSMANI, A., AWUDU, I., et al. “An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain”, *Applied Energy*, v. 102, pp. 1205–1217, 2013. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.06.054.

- [253] ZHANG, L., SHAFFER, B., BROWN, T., et al. “The optimization of DC fast charging deployment in California”, *Applied Energy*, v. 157, pp. 111–122, 2015. ISSN: 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.057.
- [254] ZHANG, Q., LI, M. “Strategyproof mechanism design for facility location games with weighted agents on a line”, *Journal of Combinatorial Optimization*, v. 28, n. 4, pp. 756–773, 2014. ISSN: 15732886. doi: 10.1007/s10878-013-9598-8.
- [255] ZHANG, F., ZHU, L. “Enhancing corporate sustainable development: Stakeholder pressures, organizational learning, and green innovation”, *Business Strategy and the Environment*, , n. January, pp. 1–15, 2019. ISSN: 10990836. doi: 10.1002/bse.2298.
- [256] ZHAO, M., CHEN, Q. “Risk-based optimization of emergency rescue facilities locations for large-scale environmental accidents to improve urban public safety”, *Natural Hazards*, v. 75, n. 1, pp. 163–189, 2015. ISSN: 15730840. doi: 10.1007/s11069-014-1313-2.
- [257] ZHENG, S., ZHOU, J. “Research on Multi-Facility Weber Problem to Reduce Carbon Emissions”. In: *Proceedings of International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings*, v. 1, cap. 100, pp. 735 – 742, 2012. ISBN: 978-3-642-34650-7. doi: 10.1007/978-3-642-34651-4.

# Apêndice A

## Trabalhos sobre localização de facilidades e meio ambiente

Este apêndice detalha, por meio da Tabela A.1, os objetivos dos artigos identificados na pesquisa cientométrica como aqueles com palavras-chaves associadas à dimensão ambiental. Reforça-se que os detalhes específicos da condução da pesquisa cientométrica foram apresentados no Capítulo 2 e os artigos com aderência a temática desta tese foram descritos no Capítulo 3.

Tabela A.1: Localização de facilidade e meio ambiente

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
Abdallah et al. (2012)	Propõem um modelo de programação inteira mista para planejamento e <i>design</i> de uma cadeia de suprimentos sensível ao carbono (considerando o fornecimento “verde”).
Accorsi et al. (2015)	Propõem um modelo de programação linear inteira mista para o <i>design</i> de cadeias de suprimentos fechadas multi-camada, considerando tanto o custo quanto a emissão de carbono.
Adivar et al. (2010)	Propõem um modelo de otimização para localização de facilidades em que se deseja minimizar o custo de distribuição de carvão e alimentos de uma ONG para famílias em situação de vulnerabilidade social.
Afshari et al. (2014)	Propõem um modelo de programação inteira mista multiobjetivo (custo e satisfação do cliente) para determinar a localização ótima de instalações em uma rede de distribuição com fluxos diretos e reversos (coleta e reciclagem).
Alidi (1992)	Propõem um modelo de programação inteira para planejamento do sistema de tratamento de disposição de resíduos perigosos considerando as diferentes necessidades dos grupos envolvidos.
Amouzegar e Moshirvaziri (1999)	Apresentam dois modelos de otimização para determinar a localização de facilidades dedicadas ao tratamento de resíduos perigosos.
Anvari e Turkay (2017)	Propõem um modelo matemático sustentável para localização de facilidades.
Atasu, Toktay e Yeo (2017)	Otimizam o processo de conteneurização de cargas médicas de Organizações não-governamentais - ONGs .
Bapna, Takur e Nair (2002)	Propõem um modelo matemático para determinar a localização ótima de postos de gasolina sem chumbo em países em desenvolvimento, considerando a máxima cobertura e o mínimo custo.
Bekkering et al. (2015)	Na segunda fase do procedimento proposto, aplicam um modelo de otimização para determinar a localização das facilidades de produção e estações de biogás visando ampliar a cobertura.
Berglund e Kwon (2014)	Buscam minimizar o custo total (operação da facilidade, transporte e risco de exposição) na localização de instalações para o processamento de materiais perigosos.
Bojarski et al. (2009)	Aplicam um modelo de otimização ao processo de planejamento e <i>design</i> da cadeia de suprimentos, considerando critérios econômicos e ambientais (categorias da Análise do Ciclo de Vida - ACV).
Bouchery e Fransoo (2014)	Por meio da distância de Manhattan e da Euclidiana, buscam determinar a localização de um terminal intermodal em uma hinterlândia e a alocação dos fluxos de transporte rodoviário (direto) e intermodal, com base no custo e na emissão de carbono.

Tabela A.1 Localização de facilidade e meio ambiente (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
Bozorgirad et al. (2013)	Analisa e comparam o desempenho econômico (custo-benefício e Valor Presente Líquido - VPL) e ambiental (ACV) das estratégias de incineração e da produção de etanol a partir dos resíduos sólidos municipais, como alternativas ao aterro sanitário.
Brandenburg (2015)	Propõe um modelo de programação inteira mista para otimizar a configuração da cadeia de suprimentos de novos produtos, considerando critérios econômicos (valor financeiro e o nível de atendimento ao cliente) e ambientais (emissão de carbono).
Briassoulis (1995)	Por meio de revisão de literatura, analisa os critérios ambientais que poderiam ser adotados em um problema de localização da instalação com a aplicação de técnicas multicritério.
Calvert (2011)	Discute sobre a relação entre geomática e a viabilidade dos sistemas de bioenergia, oferecendo informações geográficas sobre opções de fornecimento de matéria-prima e tecnologias de conversão.
Campbell, Peck e Tschudi (2010)	Analisa se haveria mudança na localização de facilidades de “risco” caso os critérios raça e etnia fossem considerados, além dos aspectos econômicos.
Carr (1996)	Faz uma análise de literatura relacionada a localização de facilidades da cadeia <i>waste-to-energy</i> (ACV) à equidade ambiental.
Castillo, Ingolfsson e Sim (2009)	Lidam com o problema de localização considerando um número fixo de instalações a serem definidas, demanda estocástica e congestionamento, em dois cenários com capacidades diferentes.
Chang, Lin e Chen (2012)	Lidam com o problema de serviços baseados em localizações, o qual envolve aplicações móveis de detecção de localizações e GPS (telecomunicações).
Chase et al. (2009)	Descrevem o desenvolvimento, implementação e avaliação de uma campanha piloto de reciclagem.
Chen, Olhager e Tang (2014)	Fazem uma revisão de literatura (recorte 1990 - 2011) com intuito de compreender os aspectos de sustentabilidade envolvidos nas decisões de localização de facilidades produtivas.
Cicas et al. (2007)	Propõem e aplicam um modelo regional de avaliação do ciclo de vida (REIO-LCA) baseado na matriz insumo-produto dos EUA.
Cloquell-Ballester et al. (2006)	Propõem uma metodologia para validação de indicadores sociais e ambientais, com estudo de caso de indicadores associados à localização de facilidades.
Coskun et al. (2016)	Propõem um modelo matemático para <i>design</i> de uma cadeia de suprimentos verde considerando três segmentos de consumidores com diferentes graus de sensibilidade ao critério ambiental na escolha.



Tabela A.1 Localização de facilidade e meio ambiente (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
Costa, Duarte e Sarache (2017)	Propõem um modelo matemático para determinar um <i>design</i> sustentável para a cadeia de suprimentos de bioetanol.
Cutter, Holm e Clark (1996)	A partir do conceito de justiça ambiental, analisam os impactos de facilidades voltadas para recepção de resíduos tóxicos e perigosos em comunidades de baixa renda.
Dam et al. (2007)	Propõem um modelo baseado no agente para avaliação de decisões de localização de <i>hubs</i> intermodais de carga, especificamente rodoferroviários.
Dao et al. (2012)	Propõem dois modelos para localização de equipamentos de emergência em <i>multistorebuildings</i> . Um visa a máxima cobertura considerando múltiplas janelas de tempo, já o outro maximiza o valor esperado de mortes evitadas ou comprometimento cerebral permanente.
Das e Shaw (2017)	Propõem um modelo matemático para minimizar o custo total de uma cadeia de suprimentos sob incerteza, considerando a emissão de carbono e fatores sociais.
Diabat et al. (2013)	Propõem um modelo matemático para <i>design</i> de cadeias de suprimentos fechadas sensíveis a carbono, considerando a possibilidade de comércio de crédito de carbono.
Dombrowski, Riechel e Döring (2014)	Fazem uma análise de literatura dedicada a indicadores e métodos de avaliação de localização de instalações (incluindo abordagens que consideram a sustentabilidade).
Dou e Sarkis (2010)	Desenvolvem um modelo para avaliação e seleção de alternativas <i>offshoring</i> considerando fatores para localização de facilidades, métricas de seleção de fornecedores e fatores de sustentabilidade
Elhedhli e Merrick (2012)	Propõem uma modelagem para <i>design</i> da cadeia de suprimentos, especialmente localização dos armazéns, considerando custo e emissão de CO <sub>2</sub> .
Erkut et al. (2008)	Propõem um modelo de programação linear inteira mista para resolver o problema de localização-alocação de facilidades de gerenciamento de resíduo sólido municipal, a nível regional, considerando critérios econômicos e ambientais.
Eskandarpour et al. (2015)	Conduzem uma revisão de literatura de <i>papers</i> que incluem os critérios sociais e/ou ambientais, além dos econômicos tradicionais, nos métodos e modelos voltados ao <i>design</i> e planejamento de cadeias de suprimentos.
Faccio et al. (2014)	Aplicam um modelo de programação linear para minimizar os custos totais dae uma cadeia de suprimentos fechada (com reprocessamento do produto no fim do ciclo de vida).
Fahimnia e Jabbarzedei (2016)	Propõem um modelo de otimização multi-objetivo, que aplica um método de pontuação de desempenho ambiental e social aos fornecedores, para determinar o <i>design</i> uma cadeia de suprimento resiliente

Tabela A.1 Localização de facilidade e meio ambiente (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
Fard, Kibert e Chini (2015)	Aplicam a AHP para determinar a localização ótima de uma cimenteira, considerando critérios sustentáveis.
Fareeduddin et al. (2015)	Apresentam modelos de otimização baseados em políticas de regulação de carbono ( <i>carbon-cap</i> , <i>carbon-tax</i> e <i>cap-and-trade</i> ) para o <i>design</i> de cadeia de suprimentos fechada.
Feitó-Cespón, Sarache e Piedra-Jimenez (2017)	Propõem um modelo matemático não linear para o <i>design</i> de uma cadeia de suprimentos sustentável voltada para reciclagem.
Fliege (2001)	Aplicam o <i>software</i> OLAF ( <i>Optimal Locating Air Polluting Facilities</i> ) para otimizar a localização de facilidades poluidoras considerando os efeitos adversos da poluição nos habitantes de determinada região.
Fox (2015)	Fazem uma revisão de literatura para determinar os tipos de manufaturas ideais para o desenvolvimento de regiões que não tem vocação e conhecimento acumulado para tal.
Garg et al. (2015)	Propõem um modelo de programação não linear biobjetivo para lidar com os problemas ambientais em cadeias de suprimentos fechadas.
Ghaddar e Naoum-Sawaya (2012)	Propõem um modelo de programação não linear misto para determinar a localização de facilidades, considerando a influência da competição de mercado e restrições associadas à emissão e ao comércio de carbono.
Govindan et al. (2016)	Priorizam as potenciais localizações de indústrias, considerando indicadores sociais, ambientais e econômicos.
Gundogdu (2011)	Com base na técnica multicritério ELECTRA, avaliam a localização de facilidades considerando o impacto ambiental potencial.
Guyon et al. (2012)	Propõem um modelo matemático para localização de plataformas logísticas em áreas urbanas considerando critérios sustentáveis.
Habibi et al. (2017)	Propõem um modelo de otimização multiobjetivo voltado para o gerenciamento de resíduos sólidos municipais, visando a redução do custo e dos impactos ambientais (emissão de CO <sub>2</sub> e intrusão visual).
Hammad e Akbarnezhad (2017)	Lidam com o problema de localização de aeroportos, considerando seus impactos (ruído e alterações no tráfego rodoviário), além da cobertura.
Han et al. (2012)	Fazem uma revisão de literatura sobre as técnicas de captura e armazenamento de carbono.
Harris, Mumford e Naim (2014)	Propõem um modelo de programação linear inteiro multiobjetivo para lidar com o problema de localização-alocação capacitado, considerando custos e emissão de CO <sub>2</sub> simultaneamente.

Tabela A.1 Localização de facilidade e meio ambiente (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
He et al. (2017)	Analisa o planejamento de um sistema de compartilhamento de veículos elétricos em regiões urbanas, propondo um modelo matemático para otimizar o serviço prestado em termos de cobertura e custo de operação.
Heikinen (2011)	Aplicam um modelo de cobertura para determinar o número ótimo e a localização das estações-base descentralizadas de uma rede <i>wireless</i> .
Higgs (2006)	Avaliam como abordagens baseadas em técnicas multicritério em conjunto com sistemas de informação geográfica pode incentivar a participação popular nas decisões sobre localização de facilidades dedicadas à resíduos.
Huang, Chen, Fan (2010)	Propõem um modelo matemática que integra as dimensões espaciais e temporais para o planejamento dos sistemas de cadeia de suprimentos de bioetanol.
Huang, Fan e Johnson (2011)	Apresentam um modelo de programação dinâmica estocástica para a construção de um sistema de produção e distribuição de hidrogênio.
Jeong e Ramírez-Gómez (2017)	Combinam uma avaliação multicritério baseada em GIS com Combinação Linear Ponderada (GIS-MCDA) para determinar a localização ótima de áreas de produção de biomassa.
Jeong e Ramírez-Gómez (2017)	Por meio de uma abordagem que combina GIS-MDCA, determinam a localização ideal para facilidades que produzem biomassa.
Jindal e Sangwan (2017)	Propõem um modelo matemático <i>fuzzy</i> para otimizar (considerando aspectos econômicos e ambientais) o <i>design</i> de uma cadeia de suprimentos fechada, sob incerteza.
Kitamura, Sakamoto e Waygood (2008)	Investigam o padrão de consumo de energia associado a viagens voltadas para compras, de 1970 a 2000, analisando os fatores o influenciaram.
Kizilboga et al. (2013)	Propõem um modelo matemático para determinar a localização ótima de centros de remanufatura, considerando os impactos econômico e ambiental.
Kovacic e Bogataj (2013)	Analisa os parâmetros (e.g. <i>lead time</i> , os custos de transporte e <i>setup</i> ) que influenciam no VPL de um sistema de logística reversa.
Kramers et al. (2015)	Estudam o impacto de ambientes de trabalhos flexíveis (e.g. <i>home-office</i> ) no sistema de transporte.
Kuby, Middleton e Bielicki (2011)	Analisa a economia associadas ao uso do modelo SimCCS (que combina GIS com pesquisa operacional) para otimizar sete fatores chave relacionados à captura e armazenamento de carbono.

Tabela A.1 Localização de facilidade e meio ambiente (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
Lainez et al. (2008)	Propõem um modelo para otimização de cadeias de suprimentos de anidrido maleico, considerando aspectos econômicos e ambientais (categorias <i>midpoint</i> do ACV).
Larumbe e Sansò (2012)	Determinam, a partir de um modelo de programação inteira mista, a localização de <i>cloud data centers</i> visando reduzir o consumo de energia e a emissão de CO <sub>2</sub> .
Li (2014)	Propõem um modelo para lidar com a programação de ônibus urbanos elétricos considerando a necessidade de troca de bateria ou o carregamento rápido em uma estação.
Liqiang e Guoxin (2015)	Propõem um modelo matemático estocástico de dois estágios para o planejamento e <i>design</i> da cadeia de suprimentos do petróleo (localização de facilidades, produção, transporte e políticas de taxaço de carbono).
Lombardi e Ferretti (2015)	Apresentam técnicas de apoio a tomada de decisão, considerando a opinião de especialistas, com enfoque em sistemas espaciais multicritério de apoio.
Mak, Rong e Shen (2013)	Propõem dois modelos de otimização para o planejamento da implantação de facilidades dedicadas à troca de bateria de carros elétricos ( <i>battery swapping station</i> ).
Manzini e Accorsi (2013)	Apresentam um panorama conceitual para a avaliação, <i>design</i> e gerenciamento da cadeia de suprimento de alimentos, considerando parâmetros de qualidade, sustentabilidade, eficiência logística e segurança.
Meneghetti e Monti (2015)	Propõem um modelo de otimização para o <i>design</i> de uma facilidade automatizada para estoque refrigerado em uma cadeia de suprimentos de alimentos, considerando a eficiência energética.
Miller, Spertus e Kamga (2014)	Compara sistemas pneumáticos de coleta de lixo com os tradicionais (por meio de caminhões), considerando três estudos de caso diferentes.
Mohammadi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam (2014)	Propõem um modelo matemático para localização de <i>hubs</i> sustentáveis (embora considere apenas fatores ambientais), em um ambiente imerso em incerteza.
Mota et al. (2015a)	Propõem um modelo de programação linear inteiro misto biobjetivo para o <i>design</i> e planejamento de cadeias de suprimento verdes fechadas.
Mota et al. (2015b)	Propõem um modelo de programação linear inteira multiobjetivo para determinar o <i>design</i> e o planejamento sustentável de cadeias de suprimentos fechadas.
Mota, Gomes e Barbosa-Povoa (2014)	Propõem um modelo matemático para o planejamento de uma cadeia de suprimentos fechada, levando em conta aspectos econômicos (custos) e sociais (taxa de desemprego e PIB).

Tabela A.1 Localização de facilidade e meio ambiente (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
Musavi e Bozorgi-Amiri (2017)	Propõem um modelo de localização de <i>hubs</i> sustentáveis e roteamento de veículos em uma cadeia de suprimentos de produtos perecíveis, considerando a responsividade e impactos ambientais.
Nema e Gupta (1999)	Propõem um modelo matemático multiobjetivo (baseado no custo e no risco) visando determinar a configuração ótima do sistema de gerenciamento regional de resíduos perigosos.
Neumüller, Kellner e Gupta (2015)	Aplicam a <i>Analytical Network Process</i> (ANP) para determinar a localização de centros de distribuição, considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais.
Nguyen e Olapiriyakul (2016)	Propõem um modelo matemático para determinar a localização de facilidades em uma cadeia de suprimentos verde, visando minimizar o impacto negativo das emissões na saúde da população.
Niknamfar e Niaki (2016)	Propõem um modelo biobjetivo (otimização do lucro dos <i>holdings</i> e <i>carriers</i> ) para localização de <i>hubs</i> em uma estrutura de colaboração centralizada ( <i>hub- and-spoke</i> ), considerando tempos de atendimento flexíveis e emissão de CO <sub>2</sub> .
Nouira et al. (2016)	Propõem uma modelagem matemática para configuração de uma cadeia de suprimentos direta (localização de facilidades e seleção de fornecedores, da tecnologia de produção e das alternativas de transporte) em que as decisões da demanda são sensíveis à emissão de carbono.
Osmani e Zhang (2013)	Propõem um modelo matemático estocástico de dois estágios para maximizar os benefícios das decisões estratégicas e táticas relacionadas a uma cadeia de abastecimento de bioetanol com base em matérias-primas de lignocelulose.
Osmani e Zhang (2013)	Propõem um modelo de otimização estocástica de dois estágios visando maximizar o lucro esperado de uma cadeia de suprimentos de bioetanol à base de lignocelulose, considerando as incertezas no fornecimento, na demanda e nos preços.
Panichelli e Gnansounou (2008)	Com base em um sistema de apoio à decisão baseado em SIG, lidam com o problema de localização-alocação de facilidades de bioenergia visando o menor custo.
Pati, Vrat e Kumar (2008)	Propõem um modelo de programação inteira mista para o gerenciamento do sistema logístico de reciclagem de papel, considerando o custo, a melhoria na qualidade do produto e os benefícios ambientais advindos da recuperação do papel descartado.
Perera e Lam (2013)	Com apoio de sistemas de informação geográfica, avaliam aspectos associados à justiça ambiental e suas implicações no planejamento de zonas industriais e na localização de facilidades potencialmente tóxicas.
Pérez, Camargo e Rincón (2017)	Fazem uma análise bibliográfica dos fatores chaves para o <i>design</i> e gerenciamento de uma cadeia de suprimentos sustentável de biorefinarias.

Tabela A.1 Localização de facilidade e meio ambiente (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
Qi, Liang e Shen (2015)	Propõem modelos para o planejamento de redes de distribuição (topologia e capacidade) com a co-localização de sistemas de armazenamento de energia sob políticas tarifárias <i>feed-in</i> .
Rao et al. (2015)	Aplicam a técnica de tomada de decisão <i>fuzzy</i> multi-atributos para seleção de localidades potenciais dedicadas a um centro de logística urbana.
Romero, Nozick e Xu (2016)	Propõem um modelo para determinar a localização de facilidades e respectivas rotas de transporte de materiais perigosos, considerando a equidade social.
Rosa et al. (2013)	Propõem um modelo matemático para localização de facilidades capacitadas em cadeias de suprimentos com fluxos bidirecionais, considerando a incerteza. Decide-se, também, o tipo de estrutura a ser instalada.
Sanchez e Callaway (2016)	Propõem um modelo de otimização para <i>design</i> das facilidades de sistemas de bioenergia baseados na captura e estoque de carbono, considerando uma tecnologia custo-efetiva e carbono-negativa.
Santibañez-Aguilar et al. (2014)	Apresentam um modelo de otimização multiobjetivo para determinar o <i>design</i> de uma cadeia de suprimentos sustentável de biorrefinarias.
Sedehzadeh et al. (2016)	Propõem um modelo multiobjetivo para o <i>design</i> de uma rede do tipo “ <i>tree hub</i> ”, que leva em conta tanto o custo total quanto o consumo de energia.
Sepúlveda e Banguera (2017)	Propõem um modelo matemático para determinar o <i>design</i> ótimo de redes de logística reversa de pneus inservíveis, considerando facilidades capacitadas.
Shaw et al. (2016)	Propõem um modelo para <i>design</i> da cadeia de suprimentos verde, considerando a emissão e o comércio de carbono, além da incerteza associada à demanda e à capacidade das facilidades.
Shukla, Pekny e Venkatasubramanian (2011)	Aplicam um modelo matemático para determinar a localização ótima de estações de reabastecimento de veículos movidos a combustíveis alternativos à gasolina e ao diesel, em que se maximize o número de veículos atendidos, respeitando as restrições de custo.
Smith et al. (2014)	Desenvolvem um modelo matemático bi-objetivo para uma cadeia de suprimentos verde.
Swersey e Thakur (1995)	Aplicam o modelo de cobertura para determinar o número, o tamanho e a localização de estações dedicadas ao teste de emissão veicular.
Talaei et al. (2016)	Propõem um modelo programação linear inteira mista para a localização-alocação de instalações multiprodutos em uma cadeia de suprimentos fechada e verde.

Tabela A.1 Localização de facilidade e meio ambiente (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
Tang e Zhang (2015)	Propõem um modelo multiobjetivo para localização de facilidade capacitada considerando o <i>trade off</i> entre custo, nível de serviço e impacto ambiental.
Taniguchi, Thompson e Yamada (2014)	Apresentam um panorama sobre as tendências e inovações nos modelos de <i>citylogistic</i> .
Tavares et al. (2011)	Apresentam uma metodologia que combina AHP e GIS para determinar a adequação de uma determinada área para instalação de uma planta de incineração de resíduos sólidos municipais.
Temur e Bolat (2017)	Propõem dois modelos matemáticos, um considerando as diretivas ambientais (regulatório) e outro levando em conta apenas a dimensão econômica (não-regulatório) para comparar o sistema de logística reversa de componentes eletrônicos em países em desenvolvimento.
Tian e Liu (2015)	Propõem dois modelos de localização para facilidades de serviço automotivo, considerando consumo de energia e emissão de carbono.
Tóffano, Nazareth e Ribeiro (2016)	Aplicam um modelo matemático baseado na teoria dos conjuntos para determinar a localização sustentável de estádios de futebol.
Treitel, Nolz e Jammernegg (2014)	Propõem um modelo para lidar com o <i>routing inventory problem</i> , incorporando aspectos econômicos e ambientais nas decisões de roteamento em uma cadeia de suprimentos com colaboração vertical.
Varsei e Polyakovskiy (2017)	Propõem um modelo matemático para o <i>design</i> sustentável de uma cadeia de suprimentos de vinho.
Verma, Gendrau e Laporte (2013)	Apresentam uma programação estocástica de dois estágios para determinar a localização de facilidades de resposta emergencial a incidentes com derramamento de óleo e seu respectivo estoque de equipamentos.
Wang et al. (2012)	Propõem um modelo de programação linear inteira mista para determinar a localização ótima das instalações e a alocação do fluxo de materiais em uma cadeia de suprimentos fechada, visando minimizar o custo, a emissão de CO <sub>2</sub> e a geração de resíduos.
Wang et al. (2013)	Propõem um modelo de programação linear inteira mista multiobjetivo para determinar o local ideal das instalações e a alocação de fluxo de materiais em uma cadeia de suprimentos fechada, com base na ecoeficiência.
Wanke et al. (2015)	Propõem um modelo matemático não linear voltado ao planejamento de redes logísticas verdes, considerando tanto os custos logísticos tradicionais, quanto os custos de emissão de carbono resultantes das atividades de transporte na cadeia de suprimentos.

Tabela A.1 Localização de facilidade e meio ambiente (continuação)

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>
Xifeng, Ji e Peng (2013)	Propõem um modelo multiobjetivo para localização de facilidades não-capacitadas, visando investigar o <i>trade-off</i> entre aspectos econômicos, ambientais e nível de serviço inerentes à decisão de localização.
Yadav et al. (2016)	Propõem um modelo matemático para minimizar o custo total da logística de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, o que envolve a determinação das localizações ótimas das facilidades.
Yanik, Surer e Oztaysi (2016)	Inspirados no problema de localização-alocação, definem <i>clusters</i> geográficos onde a necessidade de energia é equivalente ao potencial de energia verde disponível no cluster.
You et al. (2012)	Propõem um modelo de programação linear inteira mista para definir a configuração ótima da cadeia de suprimentos de etanol lignocelulósico, considerando objetivos econômicos, sociais e ambientais.
Yu e Solvang (2016)	Propõem um modelo estocástico de programação linear inteira mista para o <i>design</i> e planejamento de uma cadeia de suprimentos reversa de produtos eletrônicos, considerando critérios econômicos e ambientais.
Zhalechian et al. (2016)	Propõe um modelo matemático para o <i>design</i> de uma cadeia de suprimentos fechada sustentável (integrando decisões de localização, inventário e roteamento), sob incerteza.
Zhang e Li (2014)	Lidam com o “ <i>facility location game</i> ” estudando o comportamento do agente, avaliando mecanismos estratégicos que não envolvem dinheiro.
Zhang et al. (2013)	Propõem um modelo matemático para determinar o <i>design</i> ótimo da cadeia de suprimentos do bioetanol a base de “ <i>switchgrass</i> ”, visando minimizar o custo total.
Zhang et al. (2015a)	Resolvem o problema de cobertura visando definir a localização ótima das estações de recarga de veículos elétricos a bateria.
Zhang et al. (2015b)	Propõem um modelo para determinar a configuração de uma rede logística regional verde, considerando a emissão de CO <sub>2</sub> e a incerteza na demanda.
Zhang, Jonhson e Jonhson (2012)	Propõem um modelo de simulação voltado para as atividades-chaves da cadeia de suprimentos de biocombustíveis, usando como critérios de avaliação de desempenho o custo da matéria-prima, o consumo de energia e as emissões de GEE.
Zhao e Chen (2015)	Propõem um modelo de otimização multiobjetivo para determinar a localização de facilidades de resgate de emergência no contexto de acidentes ambientais urbanos de larga escala.
Zheng e Zhou (2012)	Inserem o custo da emissão de carbono na modelagem do problema de localização-alocação multi-facilidade não-capacitado.



# Apêndice B

## Detalhamento dos modelos matemáticos selecionados sobre localização de facilidades e meio ambiente

Visando elucidar como os artigos encontrados no Capítulo 3 lidam com a dimensão ambiental em suas formulações matemáticas, este apêndice apresenta sete modelos matemáticos escolhidos com base na diversidade de abordagens. São apresentados, nesta ordem: Afshari et al. (2014); Bojarski et al. (2009); Brandenburg (2015), Fahimnia e Jabbarzadeh (2016); Garg et al. (2015); Santibañez-Aguilar et al. (2014); e, Fareeduddin et al. (2015).

### B.1 Modelo de Afshari et al. (2014)

Afshari et al. (2014) propõem um modelo de programação linear inteira mista multiobjetivo em que se busca determinar a localização ótima de instalações (especificamente armazéns centrais e regionais) em uma rede de distribuição de serviços com fluxos diretos e reversos (coleta e reciclagem). Deseja-se minimizar os custos associados a abertura de facilidades, transporte (distribuição e coleta) e gerenciamento de estoques e, simultaneamente, maximizar a satisfação do cliente considerando uma perspectiva de rede de distribuição verde.

Para tanto, o modelo considera uma rede de distribuição de duas camadas: o produto é direcionado do armazém central para o regional e, então, é destinado ao consumidor final. O equipamento de reciclagem, por sua vez, fica no armazém regional para recuperação de materiais usados, que são coletados após o uso dos consumidores finais. Além disso, assume-se que: (i) a demanda é determinística e

pode variar ao longo do tempo; (ii) a coleta e recuperação do material usado bem como o descarte de resíduos são consideradas ações *eco-friendly*; e, (iii) a capacidade dos armazéns (centrais e regionais) é variável.

Embora seja um artigo publicado em evento científico, optou-se por apresentá-lo tendo em vista que é abordado um problema de localização-alocação com fluxos diretos e reversos. É interessante mencionar que os autores propõem a atribuição de pesos às Funções Objetivo, permitindo a análise de sensibilidade caso haja alteração na importância dos objetivos durante o processo de planejamento (tendo em vista que o modelo considera a temporalidade). Dessa forma, o modelo proposto por Afshari et al. (2014) está detalhado a seguir.

### Conjuntos e índices

L	Conjunto de armazéns centrais ( $ L  = l, k \in L$ )
M	Conjunto de armazéns regionais ( $ M  = m, j \in M$ )
N	Conjunto de clientes ( $ N  = n, i \in N$ )
O	Conjunto de produtos ( $ O  = o, t \in O$ )
F	Conjunto de períodos de tempo ( $ F  = f, p \in F$ )

### Parâmetros

$a_{pit}$	Demanda do cliente $i$ pelo produto $t$ no período $p$
$b_{pjt}$	Capacidade do depósito regional $j$ para o produto $t$ no período $p$
$c$	Custo unitário de transporte
$d_{ij}$	Distância entre o cliente $i$ e o armazém regional $j$
$d'_{jk}$	Distância entre o armazém regional $j$ e o armazém central $k$
$e_{pkt}$	Capacidade do armazém central $k$ para o produto $t$ no período $p$
$\alpha$	Peso da primeira função objetivo
$\beta$	Nível mínimo de satisfação do cliente
$q_k$	Custo de instalação do armazém central $k$
$w_j$	Custo de instalação do armazém regional $j$
$h_w$	Custo unitário de armazenagem do produto nos armazéns
$h_s$	Custo unitário de armazenagem do produto em estoque (os autores não diferenciam explicitamente no trabalho qual é a composição deste custo, em relação ao anterior)
$\pi$	Custo unitário de <i>backorder</i> (não atendimento da demanda)
$g$	Percentual de peças extras vendidas após <i>recall</i>
$s'$	Quantidade de peças que são permitidas para <i>recall</i>
$w'_j$	Custo de implantar facilidades de recuperação
$g'$	Percentual de peças que podem ser enviadas para reciclagem (ou seja, a taxa de reciclagem)

### Variáveis de decisão

$u_j$	Variável binária que indica se o armazém regional está localizado em um ponto $j$ potencial ( $u_j=1$ ) ou não ( $u_j=0$ ).
-------	---

$v_k$	Variável binária que indica se o armazém central está localizado em um ponto $k$ pontencial ( $v_k = 1$ ) ou não ( $v_k = 0$ ).
$x_{pjit}$	Percentual da demanda do consumidor $i$ pelo produto $t$ que é fornecida pelo armazém regional $j$ no período $p$ .
$y_{pkjt}$	Percentual da demanda do depósito regional $j$ para o produto $t$ que é atendida pelo armazém central $k$ no período $p$ .

## Modelagem matemática

$$\begin{aligned}
min \quad z_1 = & \sum_p \sum_j \sum_i \sum_t cd_{ij} a_{pit} x_{pjit} (1 + g \cdot s') \\
& + \sum_p \sum_k \sum_j \sum_t cd'_{jk} b_{pjt} y_{pkjt} \\
& + \sum_p \sum_j \sum_i \sum_t cd_{ij} g' a_{pit} x_{pjit} (1 + g \cdot s') \\
& + \sum_p \sum_j h_w (\sum_k \sum_t b_{pjt} y_{pkjt} - \sum_i \sum_t x_{pjit} a_{pit} (1 + g \cdot s')) \\
& + \sum_p h_s (\sum_k \sum_t e_{pkt} - \sum_k \sum_j \sum_t y_{pkjt} b_{pjt}) \\
& + \sum_{p,t} \pi (\sum_i a_{pit} - \sum_{i,j} a_{pit} (x_{pjit} + g \cdot s')) \\
& + \sum_j (w_j + w'_j) u_j + \sum_k q_k v_k
\end{aligned} \tag{B.1}$$

$$max \quad z_2 = \sum_p \sum_j \sum_i \sum_t (x_{pjit} + g \cdot s') / (n.o.f) \tag{B.2}$$

Sujeito a:

$$\sum_j x_{pjit} \leq 1 \tag{B.3}$$

$$\sum_k \sum_t b_{pjt} \geq \sum_i \sum_t a_{pit} x_{pjit} (1 + g \cdot s') \quad \forall p = 1 \tag{B.4}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_l \sum_i \sum_t b_{pjt} + (b_{p-1,jt} - (a_{p-1,it} x_{p-1,jit} (1 + g \cdot s'))) \\
& \geq \sum_i \sum_t a_{pit} x_{pjit} (1 + g \cdot s') + \\
& a_{p-1,it} (1 - x_{p-1,jit} (1 + g \cdot s')) \quad \forall p > 1
\end{aligned} \tag{B.5}$$

$$\sum_k \sum_t b_{pjt} y_{pkjt} - \sum_i \sum_t a_{pit} x_{pjit} (1 + g \cdot s') \leq \sum_t b_{pjt} \quad \forall p = 1 \tag{B.6}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_k \sum_i \sum_t b_{pjt} y_{pkjt} + b_{p-1,jt} y_{p-1,kjt} - \\
& \sum_i \sum_t (a_{pit} x_{pjit} + a_{p-1,it} x_{p-1,jit}) (1 + g \cdot s') - \\
& (a_{p-1,it} (1 - x_{p-1,jit} (1 + g \cdot s'))) \leq \sum_t b_{pjt} \quad \forall p > 1
\end{aligned} \tag{B.7}$$

$$\sum_p \sum_i x_{pjit} \leq n \cdot o \cdot u_j \tag{B.8}$$

$$\sum_j x_{pjit} \geq \beta \tag{B.9}$$

$$\sum_k y_{pkjt} \leq 2 \tag{B.10}$$

$$\sum_t y_{pkjt} \leq m \cdot o \cdot v_k \tag{B.11}$$

$$\sum_j \sum_t b_{pjt} y_{pkjt} \leq \sum_t e_{pkt} \quad \text{for } p = 1 \tag{B.12}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_j \sum_t b_{pjt} y_{pkjt} - \left( \sum_t e_{p-i,kt} - \sum_j \sum_t b_{pjt} y_{pkjt} \right) \\
& \leq \sum_t e_{pkt} \quad \text{for } p > 1
\end{aligned} \tag{B.13}$$

$$e_{pkt} v_k \geq \sum_j b_{pjt} y_{pkjt} \tag{B.14}$$

$$\sum_t b_{pjt} - \sum_i \sum_t a_{pit} x_{pjit} (1 + g \cdot s') \geq 0 \tag{B.15}$$

$$x_{pjit} \geq 0 \tag{B.16}$$

$$y_{pkjt} \geq 0 \tag{B.17}$$

$$u_j \in \{0, 1\} \tag{B.18}$$

$$v_k \in \{0, 1\} \tag{B.19}$$

A Função Objetivo  $z_1$  (B.1) visa minimizar o custo total de transporte, abertura

do armazém e gerenciamento de estoque, enquanto  $z_2$  deseja maximizar a satisfação do cliente. Para tanto, assume-se  $\alpha$  como peso de  $z_1$  e  $1 - \alpha$  como peso de  $z_2$ . Contudo, não fica claro como os pesos foram considerados no *paper*, tendo em vista que eles não estão definidos nas Funções Objetivo.

As Restrições (B.3) indicam que o percentual total de produtos  $t$  fornecidos pelos diferentes armazéns regionais  $j$  para cada cliente  $k$  deve ser menor ou igual a demanda, enquanto as restrições (B.10) estabelecem o mesmo para os armazéns centrais (os autores explicam que o valor 2 foi definido no lado direito da equação para que houvesse maior flexibilidade no atendimento dos armazéns regionais).

Já nas Restrições (B.4), (B.5), (B.6), (B.7) e (B.15) a capacidade de cada armazém regional é definida para atender a demanda dos clientes. As Restrições (B.8) garantem, por sua vez, que a demanda dos armazéns regionais abertos será atendida enquanto as Restrições (B.11) estendem essa garantia para os armazéns centrais. As Restrições (B.9) especificam o nível mínimo de satisfação do consumidor para cada período  $p$ , cliente  $i$  e produto  $t$ . As Restrições (B.12), (B.13) e (B.14) se referem à capacidade dos armazéns centrais e as demais dizem respeito ao domínio das variáveis de decisão.

Embora os autores defendam que o modelo auxilia na determinação do *design* de cadeia de suprimentos verde, a formulação matemática não considera nenhum critério ambiental nas funções objetivos propostas, tampouco nas restrições. O fator “meio ambiente” é considerado de maneira indireta, pela determinação da quantidade de itens destinados à reciclagem. Em teoria, isto poderia proporcionar redução nos impactos ambientais advindos do descarte inadequado, entretanto, precisaria ser mensurado tendo em vista que requer atividades adicionais, como transporte de coleta, que também geram impactos.

Elucida-se que, dada a dificuldade aparente em se mensurar a dimensão ambiental, muitos autores se valem desta alternativa para dizer que as suas propostas são *eco-friendly* ou verdes (como pode ser observado na Tabela A.1). Dessa maneira, embora o modelo de Afshari et al. (2014) apresente limitações e tenha um enfoque completamente diferente da proposta desta tese, pôde-se aproveitar a adoção de pesos às diferentes dimensões em análise (ambiental e econômica, no caso desta pesquisa) para avaliar os resultados advindos das importâncias relativas dadas (pelas políticas governamentais, e.g.) a cada dimensão.

## B.2 Modelo de Bojarski et al. (2009)

Bojarski et al. (2009) propõem um modelo para planejamento e *design* da cadeia de suprimentos, levando em conta fatores econômicos e ambientais. As decisões envolvem tanto a localização e a capacidade das facilidades, quanto a seleção da tec-

nologia de conversão/processamento e a rede de distribuição. Deseja-se determinar: (i) os nós ativos e os respectivos fluxos na cadeia de suprimentos; (ii) a capacidade das facilidades em cada período de tempo; (iii) a alocação das tarefas de fabricação e distribuição aos diferentes nós da rede; (iv) a quantidade de produtos finais a ser vendido; e, (v) o impacto ambiental associado a cada nó da cadeia de suprimentos (modelado por meio da ACV - usando a metodologia IMPACT2002+ do *software* GaBi - como detalhado na Seção 3.2.2).

Especialmente no que diz respeito à emissão de CO<sub>2</sub>, considera-se a possibilidade da realização de comércio de carbono em que, levando em conta o limite estabelecido pelos governos para emissão, é facultado às empresas venderem parte dos seus direitos de emissão ou comprarem estes de terceiros. Além da avaliação detalhada dos impactos ambientais da cadeia, a abordagem é multi-período (agregando complexidade ao processo de planejamento).

Dessa forma, a modelagem proposta por Bojarski et al. (2009) está detalhada a seguir. Ressalta-se que a dimensão ambiental é avaliada especificamente nas Restrições (B.27), (B.29), (B.30), (B.31), (B.43), (B.32) e (B.33).

## Conjuntos e índices

$e$	Fornecedores
$f, f'$	Localização das facilidades
$i$	Tarefas
$j$	Equipamento de tecnologia
$s$	Materiais (produto final, produto semi-acabado e matéria-prima)
$t, t'$	Períodos de planejamento
$a$	Categorias intermediárias ( <i>midpoint</i> ) de impacto ambiental
$g$	Categorias finais ( <i>endpoint</i> ) de impacto ambiental
$A_g$	Conjunto de intervenções ambientais intermediárias ( <i>midpoint</i> ) que são combinadas aos fatores de dano <i>endpoint</i> $g$
$E_{rm}$	Conjunto de fornecedores $e$ que fornecem matéria-prima
$\hat{E}_{prod}$	Conjunto de fornecedores $e$ que fornecem serviços produtivos
$\bar{E}_{tr}$	Conjunto de fornecedores $e$ que fornecem serviço de transporte
$F_e$	Conjunto de localizações $f$ onde o fornecedor $e$ está instalado
$FP$	Conjunto de materiais $s$ que são produtos finais
$I_j$	Conjunto de tarefas $i$ que podem ser executadas pela tecnologia $j$
$\bar{J}_e$	Tecnologia $j$ que está disponível no fornecedor $e$
$\tilde{J}_f$	Tecnologia $j$ que pode ser instalada na localidade $f$
$J_i$	Tecnologias $j$ que podem executar a tarefa $i$
$Mkt$	Conjunto das localizações de mercados em que o produto estará disponível para o consumidor
$RM$	Conjunto de materiais $s$ que são matéria-prima
$Sup$	Conjunto das localizações dos fornecedores
$T_L$	Conjunto de períodos em que há comércio de emissões ( <i>emission trading</i> )
$T_s$	Conjunto de tarefas que produzem o material $s$

$\bar{T}_s$	Conjunto de tarefas que consomem o material $s$
$Tr$	Conjunto de distribuição de tarefas

## Parâmetros

$A_{sft}$	Disponibilidade máxima de matéria-prima $s$ no período $t$ para a localização $f$
$Dem_{sft}$	Demanda do produto $s$ no mercado $f$ no período $t$
$Cost_t^{CO_2}$	Custo das emissões “corretas” no período $t$
$distance_{ff'}$	Distância entre a localização $f$ e a localização $f'$
$FCF_{jft}$	Custo fixo por unidade de tecnologia $j$ disponível na localização $f$ no período $t$
$I_{ft}^J$	Investimento necessário para estabelecer uma facilidade de processamento na localização $f$ no período $t$
$MaxCO_{2t}$	Emissões permitidas gratuitamente ( <i>emission cap</i> ) no período $t$
$NormF_g$	Fator de normalização da categoria de dano $g$
$Price_{sft}$	Preço do produto $s$ no mercado $f$ no período $t$
$Price_t^{CO_2}$	Preço das “emissões corretas” no período $t$
$Price_j^{Jft}$	Investimento necessário por unidade de tecnologia $j$ com capacidade aumentada na facilidade $f$ no período $t$
$rate$	Taxa de desconto
$\alpha_{sij}$	Fração da tarefa $i$ para produção do material $s$ no equipamento $j$
$\bar{\alpha}_{sij}$	Fração da tarefa $i$ para consumo do material $s$ no equipamento $j$
$\beta_{jf}$	Taxa de utilização mínima da tecnologia $j$ que é permitida na localização $f$
$\zeta_{ag}$	Fator de caracterização de dano endpoint $g$ para intervenção ambiental $a$
$\theta_{ijff'}$	Taxa de utilização da tecnologia $j$ pela tarefa $i$ cuja origem é a localização $f$ e o destino é a localização $f'$
$\rho_{tr}^{eff't}$	Custo unitário de transporte da localização $f$ para localização $f'$ durante o período $t$
$\tau_{ijfet}^{ut1}$	Custo unitário associado à tarefa $i$ feita no equipamento $j$ da localização $f$ e pagável ao fornecedor externo $e$ durante o período $t$
$\tau_{sfet}^{ut2}$	Custo unitário associado ao manuseio do estoque do material $s$ na localização $f$ e pagável ao fornecedor externo $e$ durante o período $t$
$\chi_{est}$	Custo unitário da matéria-prima $s$ oferecida pelo fornecedor externo $e$ no período $t$
$\psi_{ijffa}$	Categoria de impacto ambiental $a$ (fator de caracterização) para a tarefa $i$ executada usando a tecnologia $j$ , a partir de materiais recebidos do nó $f$ e entregues no nó $f'$
$\psi_{ija}^T$	Categoria de impacto ambiental $a$ para o transporte de uma unidade de massa de material, a uma unidade de distância

## Variáveis de decisão

$JB_{ft}^l$	Indica se a planta de processamento está aberta na localização $f$ no período de tempo $t$ ( $JB_{ft}^l = 1$ ) ou não ( $JB_{ft}^l = 0$ ).
$V_{jft}$	Indica se a tecnologia $j$ está instalada na localização $f$ no período de tempo $t$ ( $V_{jft} = 1$ ) ou não ( $V_{jft} = 0$ )
$Buy_t^{CO_2}$	Quantidade de emissões além do limite estabelecido que foram “compradas” no período $t$

$DamC_{gft}$	Dano <i>endpoint g</i> normalizado para a localização <i>f</i> no período <i>t</i>
$DamC_g^{SC}$	Dano <i>endpoint g</i> normalizado ao longo de toda cadeia de suprimentos
$EPurch_{et}$	Valor econômico das compras executadas no período <i>t</i> do fornecedor <i>e</i>
$ESales_t$	Valor econômico das vendas feitas no período <i>t</i>
$FAsset_t$	Investimentos em ativos fixos no período <i>t</i>
$FCost_t$	Custos fixos no período <i>t</i>
$F_{jft}$	Capacidade total da tecnologia <i>j</i> durante o período <i>t</i> na localização <i>f</i>
$FE_{jft}$	Capacidade incremental da tecnologia <i>j</i> na localização <i>f</i> durante o período de tempo <i>t</i>
$IC_{aft}$	Impacto ambiental <i>a</i> intermediário ( <i>midpoint</i> ) associado ao sítio <i>f</i> decorrente de atividades no período <i>t</i>
$Impact_f^{2002}$	Impacto ambiental total do sítio <i>f</i>
$Impact_{overall}^{2002}$	Impacto ambiental total para toda cadeia de suprimentos
$Net_t^{CO_2}$	Resultado líquido do comércio de emissões no período <i>t</i>
$VPL$	Valor presente líquido
$P_{ijff't}$	Magnitude da tarefa <i>i</i> no equipamento/tecnologia <i>j</i> no período <i>t</i> cuja origem é a localização <i>f</i> e o destino é a <i>f'</i> ,
$Profit_t$	Lucro obtido no período <i>t</i>
$Purch_{et}^{pr}$	Quantidade de dinheiro pago ao fornecedor <i>e</i> no período <i>t</i> associado a atividades produtivas
$Purch_{et}^{rm}$	Quantidade de dinheiro pago ao fornecedor <i>e</i> no período <i>t</i> associado ao consumo de matéria-prima
$Purch_{et}^{tr}$	Quantidade de dinheiro pago ao fornecedor <i>e</i> no período <i>t</i> associado ao serviço de transporte
$Sales_t^{CO_2}$	Quantidade de direito de emissões vendidas no período <i>t</i>
$Sales_{sff,t}$	Quantidade de produto <i>s</i> vendido pela localização <i>f</i> no mercado <i>f'</i> no período <i>t</i>
$S_{sft}$	Quantidade de estoque de material <i>s</i> na localização <i>f</i> no período <i>t</i>

Os autores destacam que a variável mais relevante é a  $P_{ijff't}$ , tendo em vista que para facilitar a modelagem da dimensão ambiental, os sítios de manufatura e centros de distribuição são tratados de maneira iguais, assim como as atividades de produção e distribuição. No caso da atividade de produção, por exemplo, considera-se que a recepção e entrega do material ocorra no mesmo lugar (ou seja, da localidade *f* para própria *f*, dentro da mesma planta). Já para as atividades de distribuição, recebe-se de *f* e destina-se a *f'*.

## Modelagem matemática

$$\min_{x,y}(-VPL, DamC_g^{SC}, Impact_{overall}^{2002}) \quad (B.20)$$

Sujeito a:



$$S_{sft} - S_{sft-1} = \sum_{f'} \sum_{i \in T_s} \sum_{j \in (J_i \cap \tilde{J}_{f'})} \alpha_{sij} P_{ijf'ft} - \sum_{f'} \sum_{i \in \bar{T}_s} \sum_{j \in (J_i \cap \tilde{J}_f)} \bar{\alpha}_{sij} P_{ijff't} \quad \forall f, s, t \quad (\text{B.21})$$

$$V_{jft} F E_{jft}^L \leq F E_{jft} \leq V_{jft} F E_{jft}^U \quad \forall f, j \in \tilde{J}_f, t \quad (\text{B.22})$$

$$F_{jft} = F_{jft-1} + F E_{jft} \quad \forall f, j \in \tilde{J}_f, t \quad (\text{B.23})$$

$$\beta_{jf} F_{jft-1} \leq \sum_{f'} \sum_{i \in I_j} \theta_{ijff'} P_{ijff't} \leq F_{jft-1} \quad \forall f, j \in \tilde{J}_f, t \quad (\text{B.24})$$

$$\sum_{f'} \sum_{i \in \bar{T}_s} \sum_{j \in J_i} P_{ijff't} \leq A_{sft} \quad \forall s \in RM, f \in Sup, t \quad (\text{B.25})$$

$$\sum_{f'} \sum_{i \in T_s} \sum_{j \in J_i} P_{ijff't} \leq Dem_{sft} \quad \forall s \in FP, f \in Mkt, t \quad (\text{B.26})$$

$$IC_{aft} = \sum_{j \in \tilde{J}_f} \sum_{i \in I_j} \sum_{f'} \psi_{ijff'a} P_{ijff't} \quad \forall a, f, t \quad (\text{B.27})$$

$$\psi_{ijff'a} = \psi_{ija}^T distance_{ff'} \quad \forall i \in Tr, j \in J_i, a, f, f' \quad (\text{B.28})$$

$$DamC_{gft} = \sum_{a \in A_g} Norm F_g \zeta_{ag} IC_{aft} \quad \forall g, f, t \quad (\text{B.29})$$

$$DamC_g^{SC} = \sum_f \sum_t DamC_{gft} \quad \forall g \quad (\text{B.30})$$

$$\sum_f \sum_{a \in A_g} \sum_{t'=t-L+1} \zeta_{ag} IC_{aft'} = MaxCO_{2t} + Buy_t^{CO_2} - Sales_t^{CO_2} \quad \forall g = ClimateChange, t \in T_L \quad (\text{B.31})$$

$$Impact_f^{2002} = \sum_g \sum_t DamC_{gft} \quad \forall f \quad (\text{B.32})$$

$$Impact_{overall}^{2002} = \sum_f \sum_g \sum_t DamC_{gft} \quad (\text{B.33})$$

$$ESales_t = \sum_{S \in FP} \sum_{f \in Mkt} \sum_{f' \notin Mkt \cup Sup} Sales_{sf'ft} Price_{sft} \quad \forall t \quad (\text{B.34})$$

$$FCost_t = \sum_{f \notin (Mkt \cup Sup)} \sum_{j \in \bar{J}_f} FCF J_{jft} F_{jft} \quad \forall t \quad (B.35)$$

$$EPurch_{et} = Purch_{et}^{rm} + Purch_{et}^{tr} + Purch_{et}^{prod} \quad \forall e, t \quad (B.36)$$

$$Purch_{et}^{rm} = \sum_{S \in RM} \sum_{f \in F_e} \sum_{i \in \bar{T}_s} \sum_{j \in J_i} P_{iff't} \chi_{est} \quad \forall e \in E_{rm}, t \quad (B.37)$$

$$Purch_{et}^{tr} = \sum_{i \in Tr} \sum_{j \in J_i \cap \bar{J}_e} \sum_f \sum_{f'} P_{iff't} \rho_{eff't}^{tr} \quad \forall e \in \bar{E}_{tr}, t \quad (B.38)$$

$$Purch_{et}^{prod} = \sum_f \sum_{i \notin Tr} \sum_{j \in (J_i \cap \hat{J}_f)} P_{iff't} \tau_{ijft}^{ut1} + \sum_S \sum_{f \notin (Sup \cup Mkt)} S_{sft} \tau_{sft}^{ut2} \quad \forall e \in \tilde{E}_{prod}, t \quad (B.39)$$

$$FAsset_t = \sum_f \sum_j Price_{jft}^J FE_{jft} + I_{ft}^J JB_{ft} \quad \forall t \quad (B.40)$$

$$\sum_{j \in \bar{J}_f} \left( \sum_{t' \leq t} JB_{ft'} - V_{jft} \right) \geq 0 \quad \forall f \notin (Sup \cup Mkt), t \quad (B.41)$$

$$\sum_t JB_{ft} \leq 1 \quad \forall f \notin (Sup \cup Mkt) \quad (B.42)$$

$$Net_t^{CO_2} = Price_t^{CO_2} Sales_t^{CO_2} - Cost_t^{CO_2} Buy_t^{CO_2} \quad \forall t \in T_L \quad (B.43)$$

$$Profit_t = ESales_t + Net_t^{CO_2} - \left( FCost_t + \sum_e EPurch_{et} \right) \quad \forall t \quad (B.44)$$

$$VPL = \sum_t \left( \frac{Profit_t - FAsset_t}{(1 + rate)^t} \right) \quad (B.45)$$

$$\mathcal{X} \in \{0, 1\} \quad (B.46)$$

$$\mathcal{Y} \in \mathbb{R}^+ \quad (B.47)$$

Onde:  $\mathcal{X}$  diz respeito ao conjunto de variáveis binárias e  $\mathcal{Y}$  está associado às variáveis contínuas.

As Restrições (B.21) dizem respeito ao balanço de massa para cada tipo de material  $s$  consumido em cada facilidade potencial  $f$  durante o período  $t$ .  $\alpha_{sij}$  e  $\bar{\alpha}_{sij}$  são considerados fixos e constantes, uma vez que o planejamento é feito do ponto de vista estratégico (isso auxilia no processo de resolução, pois mantém o modelo linear).

As Restrições (B.22) e (B.23) estão relacionadas à mudança de capacidade de uma facilidade ao longo do tempo (onde  $L$  e  $U$  são os limitantes mínimos e máximos, respectivamente). Já as Restrições (B.24) asseguram que a taxa de produção total em cada localidade será maior ou igual a taxa de produção mínima desejável e menor que a capacidade disponível. As Restrições (B.25) relacionam a aquisição de matéria-prima às limitações físicas do local para armazená-la, indicando que a quantidade comprada no período  $t$  tem que ser menor ou igual a capacidade definida; enquanto a (B.26) garante que o volume de vendas do produto  $s$  no mercado  $f$  durante o período de tempo  $t$  será menor ou igual a demanda.

As Equações (B.27) dizem respeito ao impacto ambiental associado a uma localização  $f$  advindo das atividades realizadas em um período  $t$ , sendo expressa pelo somatório dos impactos preconizados no modelo IMPACT2002+ adotado na ACV. Destaca-se que  $\psi_{ijffta}$  é considerado fixo e constante, pois na ACV todos os impactos ambientais diretos são considerados lineares em relação à unidade funcional. Assim, a Restrição (B.28) permite calcular o valor do  $\psi_{ijffta}$  para o transporte, tendo em vista que para esta atividade assume-se que o impacto está alocado no nó de origem.

As Equações (B.29) e (B.30) demonstram como o dano *endpoint*  $g$  é calculado, sendo a primeira aplicada para uma localização  $f$  e a segunda para toda cadeia de suprimentos. As Restrições (B.31) são usadas para determinar o comércio de emissões de CO<sub>2</sub>. Elas indicam que o total de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente na cadeia de suprimentos deve ser igual o limite de emissões (sem taxa) somado ao direito extra de emissão adquirido por meio de compra, deduzido do direito de emissão vendido a terceiros no período  $t$ . Já a receita líquida associada ao comércio de emissões é apresentado nas Equações (B.43).

As Equações (B.32) e (B.33) demonstram como o impacto ambiental total de uma determinada facilidade  $f$  e da cadeia de suprimentos são calculados, respectivamente. As Restrições (B.34), por sua vez, expressam como a receita líquida total é calculada enquanto as Restrições (B.35) se concentram na definição dos custos fixos. O custo decorrente de compras feitas junto ao fornecedor  $e$  é apresentado nas Equações (B.36), sendo que os custos que a compõem estão detalhados nas Equações (B.37) (aquisição de matéria-prima), (B.38) (serviço de transporte) e (B.39) (produção). Verifica-se nas Equações (B.39) que ganhos de escala não são considerados. O lucro no período  $t$  é calculado por meio das Equação (B.44), enquanto se aplicada a Equação (B.45) para o VPL.

Por fim, as Equações (B.40) demonstram como o investimento total de ativos é calculado. As Restrições (B.41), (B.42), (B.46) e (B.47) dizem respeito ao domínio das variáveis de decisão.

Verifica-se que o modelo de Bojarski et al. (2009) tem um viés totalmente empresarial buscando definir a configuração ideal de uma cadeia de suprimentos, em que se minimize os impactos ambientais e, ao mesmo tempo, maximize o valor financeiro de toda a cadeia. No estudo de caso aborda-se uma cadeia de suprimentos de anidrido maleico considerando: duas tecnologias de produção, os fornecedores e mercados consumidores existentes, bem como as possíveis localizações das plantas produção. Assim, a decisão de localização de facilidades é apenas adjacente ao *design* da cadeia de suprimentos.

A intermodalidade sequer é mencionada no trabalho, evidenciando que a proposta é completamente diferente da presente pesquisa. Além disso, adota-se a ACV para avaliação dos impactos ambientais, técnica cuja complexidade e a ausência de um banco de dados completo inviabiliza, em grande parte, sua utilização no contexto desta tese.

Tendo em vista que os modelos matemáticos de otimização que adotam ACV para mensuração dos impactos ambientais normalmente apresentam modelagens restritas ao contexto em estudo (Eskandarpour et al., 2015), optou-se por não detalhar neste apêndice outros trabalhos cuja modelagem matemática adote tal técnica, por não estarem alinhados com a proposta da tese.

### **B.3 Modelo de Brandenburg (2015)**

Brandenburg (2015) propõe um modelo de programação linear inteira mista multiobjetivo para definir a configuração ótima de uma cadeia de suprimentos verde, que prevê o lançamento de novos produtos no mercado ao longo de diferentes horizontes de planejamento (multi-período). Assim, deseja-se maximizar a rentabilidade da cadeia e o nível de serviço ao consumidor, ao mesmo tempo em que se busca o mínimo impacto ambiental do sistema (em termos de emissão de carbono).

O nível de serviço é avaliado pela relação entre o volume de vendas efetivamente efetuado e a demanda de determinada região. Já o impacto ambiental considera as emissões provenientes tanto das atividades logísticas, quanto do processo de manufatura e armazenagem. Assim, o autor define a proposta como um modelo ganha-ganha em que se consegue estabelecer uma cadeia de suprimentos ecologicamente correta sem prejudicar o desempenho econômico.

Ressalta-se que, como o comportamento da demanda é incerto, foi feita uma análise de sensibilidade voltada à avaliação do comportamento dos elos da cadeia de suprimentos frente a demandas estocásticas. Evidencia-se, no entanto, que a abor-

dagem do modelo proposto está mais direcionada à alocação do que à localização. Definem-se os fluxos de produtos, considerando o lançamento de novidades no mercado e se o conjunto de fábricas já existentes está operando (ou não) em determinado período de tempo.

Além disso, a modelagem parece estar destinada a produtos manufaturados (e não *commodities*, como nesta tese), o que pode ser corroborado no estudo de caso aplicado à indústria de cosméticos. Ainda, trata-se de um modelo de produção empurrada em que considera-se explicitamente a existência de estoque para atendimento da demanda. Assim, o transporte é apenas uma atividade logística associada ao funcionamento da cadeia de suprimentos (e não o enfoque da análise).

A modelagem matemática proposta por Brandenburg (2015) está descrita a seguir. A dimensão ambiental é tratada tanto na Função Objetivo (B.50), quanto nas Restrições (B.78).

## Conjuntos e índices

$k$	Componente da embalagem
$p$	Produto final
$s$	Fornecedor de embalagem
$L$	Conjunto de plantas de produção
$R$	Conjunto de regiões de demanda
$\Theta$	Conjunto de conexões de transporte, $\Theta \subseteq (\{s\} \cup L) \times (L \cup R) \times M_t$
$\Theta_x$	Conjunto de conexões de transporte que terminam na localidade $x \in L \cup R$ , i.e. $\exists y \in \{s\} \cup L, m \in M_t : (y, x, m) \in \Theta$
$M_t$	Conjunto de modos de transporte, $M_t = \{regular; expresso\}$
$M_p$	Conjunto de modos de produção, $M_c = \{base; excesso\}$
$T$	Horizonte de planejamento

## Parâmetros

$\delta_\theta$	Tempo de duração do transporte via conexão $\theta \in \Theta$
$\pi_\theta^{trans}$	Custo do transporte via conexão $\theta \in \Theta$
$\pi_{m,l}^{conv}$	Custo de conversão no modo de produção $m \in M_c$ na planta $l \in L$
$\pi^{raw}$	Custo da matéria-prima para uma unidade de produto final $p$
$\pi^{pack}$	Custo de embalagem para uma unidade de produto final $p$
$\pi_{i,x}^{store}$	Custo de estoque por unidade do item $i \in \{k, p\}$ e período na localização $x \in L \cup R$
$\pi_l^{trial}$	Custo de produção “trial” <sup>1</sup> (antes do lançamento) na planta $l \in L$
$\pi_r^{sell}$	Preço de venda do produto final $p$ na região de demanda $r \in R$
$\pi^{cap}$	Custo de capital
$k_{m,l}^{conv}$	Capacidade de produção do modo $m \in M_p$ na planta $l \in L$
$k^{pack}$	Capacidade de produção no fornecedor $s$
$\lambda^{conv}$	Tamanho do lote mínimo de produção

<sup>1</sup>Entende-se como produto de teste ou piloto, que é lançado no mercado antes da produção e lançamento do produto final

$\lambda^{pack}$	Quantidade mínima da ordem para embalagem de material $k$
$d_{r,t}$	Demanda de mercado do produto acabado $p$ na região $r \in R$ e no período $t \in T$
$d_{r,t}^{pipe}$	Quantidade de demanda no <i>pipeline</i> <sup>2</sup> por produto acabado $p$ na região $r \in R$ e no período $t \in T$
$SL^{min}$	Requisito mínimo de nível de serviço
$\mathcal{X}_{p,l}^{conv}$	Emissão decorrente da produção de uma unidade do produto $p$ na planta $l \in L$
$\mathcal{X}_{i,x}^{store}$	Emissão decorrente da armazenagem de uma unidade do item $i \in \{k, p\}$ na localidade $i \in L \cup U$
$\mathcal{X}_{p,\theta}^{trans}$	Emissão decorrente do transporte de uma unidade do item $i \in \{k, p\}$ pela conexão $\theta \in \Theta$

## Variáveis de decisão

$y_{l,t}^{trial}$	Variável binária que indica se há produção “trial” na planta $l \in L$ e lançamento no período $t \in T$
$y_{x,t}$	Variável binária que indica se a planta de produção/localidade $x \in \{s\} \cup L$ está operando no período $t \in T$
$q_{r,t}^{sales}$	Quantidade de vendas do produto final $p$ na região de demanda $r \in R$ e período $t \in T$
$q_{r,t}^{lost}$	Quantidade de vendas perdidas de produtos finais $p$ na região de demanda $r \in R$ e período $t \in T$
$\epsilon_{r,t}^{pipe}$	Grau de utilização do <i>pipeline</i> na região de demanda $r \in R$ e período $t \in T$
$q_{i,x,t}^{store}$	Quantidade em estoque do item $i \in \{k, p\}$ na localidade $x \in L \cup R$ e no período $t \in T$
$q_{i,r,t}^{storecost}$	Quantidade em estoque do item $i \in \{k, p\}$ na localidade $x \in L \cup R$ e no período $t \in T$ que gera custo de armazenagem
$q_{i,\theta,t}^{trans}$	Quantidade do item $i \in \{k, p\}$ transportada pela conexão de transporte $\theta \in \Theta$ no período $t \in T$
$q_{m,l,t}^{conv}$	Quantidade produzida empregando o modo $m \in M_c$ na planta $l \in L$ no período $t \in T$
$q_t^{pack}$	Número de ordens para material de embalagem $k$ do fornecedor $s$ no período $t \in T$
$cf_t$	Fluxo de caixa no período $t \in T$
$ci_t$	Entrada de caixa no período $t \in T$
$co_t$	Saída de caixa no período $t \in T$
$c_t^{store}$	Custo total de armazenagem no período $t \in T$
$c_t^{trans}$	Custo total de transporte no período $t \in T$
$c_t^{pack}$	Custo total de material de embalagem no período $t \in T$
$c_t^{raw}$	Custo total de matéria-prima no período $t \in T$
$c_t^{conv}$	Custo total de conversão no período $t \in T$
$c_t^{trial}$	Custo total de produção de “trial” no período $t \in T$
$e_t$	Emissão total de carbono no período $t \in T$

Destaca-se que, das variáveis apresentadas, apenas  $cf_t$  pode assumir valores negativos porque diz respeito a pagamentos efetuados (classificados como “saídas de caixa”).

---

<sup>2</sup>Representa, a grosso modo, as etapas anteriores a efetivação de determinado processo, que pode ser uma venda ou o desenvolvimento de um novo produto, por exemplo.

## Modelagem matemática

$$\max \quad VPL = \sum_{t \in T} \frac{cf_t}{(1 + \pi^{cap})^t} \quad (\text{B.48})$$

$$\max \quad NS = \frac{\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} q_{r,t}^{sales}}{\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} d_{r,t}} \quad (\text{B.49})$$

$$\min \quad EMIS = \sum_{t \in T} e_t \quad (\text{B.50})$$

Sujeito a:

$$\sum_{t \in T} y_{l,t}^{trial} \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (\text{B.51})$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{t \in T} y_{l,t}^{trial} \leq 1 \quad (\text{B.52})$$

$$y_{l,t} \leq \sum_{\tau < t} y_{l,\tau}^{trial} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (\text{B.53})$$

$$q_{r,t}^{sales} + q_{r,t}^{lost} = d_{r,t} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (\text{B.54})$$

$$d_{r,t}^{pipe} \epsilon_{r,t}^{pipe} \leq q_{p,r,t}^{store} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (\text{B.55})$$

$$q_{r,t}^{sales} \leq d_{r,t} \epsilon_{r,t}^{pipe} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (\text{B.56})$$

$$\epsilon_{r,t}^{pipe} \leq 1 \quad \forall r \in R, t \in T \quad (\text{B.57})$$

$$SL^{min} \leq SL \quad (\text{B.58})$$

$$\lambda^{pack} y_{s,t} \leq q_t^{pack} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.59})$$

$$q_t^{pack} \leq k_{pack} y_{s,t} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.60})$$

$$\lambda^{conv} y_{l,t} \leq \sum_{m \in M_c} q_{m,l,t}^{conv} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (\text{B.61})$$

$$q_{m,l,t}^{conv} \leq k_{m,l}^{conv} y_{l,t} \quad \forall m \in M_c, l \in L, t \in T \quad (\text{B.62})$$

$$q_t^{pack} = \sum_{l \in L} \sum_{m \in M_t} \sum_{(s,l,m) \in \Theta} q_{k,(s,l,m),t}^{trans} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.63})$$

$$\sum_{m \in M_c} q_{m,l,t}^{conv} = \sum_{r \in R} \sum_{m \in M_t} \sum_{(l,r,m) \in \Theta} q_{p,(l,r,m),t}^{trans} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (\text{B.64})$$

$$q_{p,r,t}^{store} = q_{p,r,t-1}^{store} - q_{r,t}^{sales} + \sum_{\theta \in \Theta_r} q_{p,\theta,t-\delta_\theta}^{trans} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (\text{B.65})$$

$$q_{k,l,t}^{store} = q_{k,l,t-1}^{store} - \sum_{m \in M_c} q_{m,l,t}^{conv} + \sum_{\theta \in \Theta_l} q_{k,\theta,t-\delta_\theta}^{trans} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (\text{B.66})$$

$$cf_t = ci_t - co_t \quad \forall t \in T \quad (\text{B.67})$$

$$\sum_{r \in R} \pi_r^{sell} q_{r,t}^{sales} = ci_t \quad \forall t \in T \quad (\text{B.68})$$

$$co_t = c_t^{store} + c_t^{trans} + c_t^{pack} + c_t^{raw} + c_t^{conv} + c_t^{trial} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.69})$$

$$\sum_{i \in \{k,p\}} \sum_{x \in LUU} \pi_{i,x}^{store} q_{i,x,t}^{storecost} = c_t^{store} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.70})$$

$$\sum_{i \in \{k,p\}} \sum_{\theta \in \Theta} \pi_\theta^{trans} q_{i,\theta,t}^{trans} = c_t^{trans} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.71})$$

$$\sum_{m \in M_c} \sum_{l \in L} \pi_{m,l}^{raw} q_{m,l,t}^{conv} = c_t^{raw} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.72})$$

$$\pi^{pack} q_t^{pack} = c_t^{pack} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.73})$$

$$\sum_{m \in M_c} \sum_{l \in L} \pi_{m,l}^{conv} q_{m,l,t}^{conv} = c_t^{conv} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.74})$$

$$\sum_{l \in L} \pi_l^{trial} q_{l,t}^{trial} = c_t^{trial} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.75})$$

$$q_{p,r,t}^{store} - d_{r,t}^{pipe} \leq q_{p,r,t}^{storecost} \quad \forall r \in R, t \in T \quad (\text{B.76})$$

$$q_{k,l,t}^{storecost} = q_{k,l,t}^{store} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (\text{B.77})$$



$$e_t = \sum_{i \in \{k,p\}} \sum_{\theta \in \Theta} \mathcal{X}_{i,\theta}^{trans} q_{i,\theta,t}^{trans} + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M_c} \mathcal{X}_{p,l}^{conv} q_{m,l,t}^{conv} + \sum_{i \in \{p,k\}} \sum_{x \in L \cup R} \mathcal{X}_{i,x}^{store} q_{i,x,t}^{store} \quad \forall t \in T \quad (\text{B.78})$$

As Equações (B.48) e (B.49) são as Funções Objetivo vinculadas à dimensão econômica, sendo que a primeira diz respeito à maximização do VPL da empresa e a segunda à maximização do nível de serviço médio alcançado. Destaca-se que o cálculo do VPL apresentado no artigo só faz sentido se o investimento inicial for igual a zero. Caso contrário, a Função Objetivo (B.48) representa apenas uma anualização dos fluxos de caixa (e não o VPL). Já a Função Objetivo (B.50) apresenta a Função Objetivo relacionada ao critério ambiental, em que se deseja minimizar as emissões totais de carbono.

As Restrições (B.51) asseguram que será feito, no máximo, um “trial” para cada produto em cada planta. O autor diz que estas restrições podem ser substituída pelas Restrições (B.52) caso se opte por uma rede de produção centralizada, em que uma única planta atenda a todas as regiões de demanda. Já as Restrições (B.53) indicam que o “trial” tem que ser produzido e lançado antes que sua produção realmente comece, em outras palavras, o teste do novo produto deve acontecer antes que ele entre efetivamente no plano de produção.

As Restrições (B.54) garantem que as vendas efetuadas mais as vendas perdidas refletem exatamente a demanda. Dessa forma, não há a possibilidade de *backlog* (ou seja, manter pedidos em atraso para entregá-los em um período de tempo posterior). Já as Restrições (B.55) demonstram que a indisponibilidade de produtos para venda resulta de um *pipeline* incompleto, o que pode impactar negativamente na demanda (conforme Restrições (B.56)). As Restrições (B.57) indicam que a taxa máxima de utilização do *pipeline* é 100% e as (B.58) asseguram que o nível de serviço mínimo precisa ser atingido (permitindo, também, flexibilizar esta restrição, adotando  $SL^{min} = 0$ ).

As Restrições (B.59) a (B.62) fazem referências a restrições operacionais, lotes mínimos e capacidades do fornecedor e da planta de produção. Já as Restrições (B.63) a (B.66) estão associadas ao fluxo de materiais. As Equações (B.63) e (B.64) asseguram a estratégia de produção empurrada, enquanto (B.65) e (B.66) dizem respeito ao balanço de massa de produtos finais e componentes, respectivamente.

As Restrições (B.67) a (B.69) estão relacionados ao fluxo de caixa: entradas (B.68), saídas (B.69) e fluxo de caixa final (B.67). Já as Restrições (B.70) a (B.75) ao cálculo dos custos: de estoque (B.70), de transporte (B.71), de matéria-prima (B.72), dos componentes de embalagem (B.73), produção do produto final (B.74) e

de produção dos *trials* (B.75).

As Restrições (B.76) e (B.77) indicam que não há custo de estoques associados ao *pipeline* porque estes ficam nas lojas de varejo que são operadas e pagas por terceiros. Já as Restrições (B.78) determinam como as emissões de carbono são computadas, decorrentes das atividades de transporte (entrada e saída), processo produtivo e armazenagem. Salienta-se que não são apresentadas explicitamente restrições associadas ao domínio das variáveis de decisão.

Embora o modelo de Brandenburg (2015) considere a dimensão ambiental como um dos pré-requisitos para otimização da cadeia de suprimentos, verifica-se que o foco da análise está mais centrado no processo de lançamento de novos produtos do que na localização de facilidades, em si. Ainda assim, o modelo foi útil para a presente pesquisa ao demonstrar uma das maneiras que a dimensão ambiental poderia ser tratada.

## B.4 Modelo de Fahimnia e Jabbarzadeh (2016)

Fahimnia e Jabbarzadeh (2016) propõem um modelo matemático que permite avaliar a sustentabilidade da cadeia de suprimentos (com base em notas atribuídas especificamente aos fornecedores) levando em conta, também, a possibilidade de interrupções. Ou seja, busca-se definir um *design* resiliente para a cadeia de suprimentos, de maneira que esta seja capaz de manter sua operação diante das incertezas e contingências. Assim, o modelo auxilia na determinação de estratégias de abastecimento de matéria-prima (alvo das interrupções) e de decisões de projeto da cadeia de suprimentos (como localização das fábricas e dos centros de distribuição).

As avaliações ambientais e sociais são feitas por meio de pontuações atribuídas aos fornecedores com base em pesquisa com especialistas. Nota-se, portanto, que a análise da sustentabilidade se concentra em apenas um elo (suprimento) e não na cadeia como um todo (como o título sugere). Em relação às pontuações, os especialistas entrevistados consideraram como critérios mais relevantes para a determinação do impacto ambiental: “fontes alternativas de energia”, “consumo de água” e “emissão de GEE”.

Ressalta-se que, diferente de outros artigos já investigados no Capítulo 3, o item “consumo de água” tem destaque em relação à emissão de GEE porque o processo de transformação estudado (transformação da fibra sintética) é energo-intensivo e requer uma grande quantidade de água. Já o escore social envolveu “trabalho digno”, “direitos humanos”, “sociedade” e “responsabilidade do produto”. Cada um dos fornecedores foi visitado por uma equipe de auditoria que os avaliou segundo tais critérios em uma escala de 1 - 10 (sendo 10, o melhor desempenho).

Salienta-se, ainda, que os autores propuseram 27 cenários para avaliar o impacto

da disrupção dos fornecedores na sustentabilidade da cadeia. Assim, o modelo proposto por Fahimnia e Jabbarzadeh (2016) está definido na Seção B.4 do Apêndice B. Nota-se que as dimensões ambiental e social são tratadas nas Funções Objetivo (B.80) e (B.81), respectivamente.

## Conjuntos e índices

$R$	Conjunto dos tipos de matérias-primas, onde $r \in R$
$I$	Conjunto de tipos/famílias de produtos, onde $i \in I$
$N$	Conjunto de fornecedores, onde $n \in N$
$M$	Conjunto de locais potenciais para fábricas, onde $m \in M$
$W$	Conjunto de locais potenciais para os centros de distribuição, onde $w \in W$
$J$	Conjunto de zonas de mercado, onde $j \in J$
$U$	Conjunto de níveis de capacidade nas fábricas, onde $u \in U$
$V$	Conjunto de níveis de capacidade nos centros de distribuição, onde $v \in V$
$K$	Conjunto de modos de transporte para o envio de produtos das fábricas aos centros de distribuição, onde $k \in K$
$L$	Conjunto de modos de transporte para o envio de produtos dos centros de distribuição para as zonas de mercado, onde $l \in L$
$S$	Conjunto de cenários disruptivos (interrupção no fornecimento), onde $s \in S$

## Parâmetros

$a_n^s$	Indica se o fornecedor $n$ foi interrompido no cenário $s$ ( $a_n^s = 1$ ; caso contrário, $a_n^s = 0$ ).
$a'_{rnm}$	Indica se o fornecedor $n$ está disponível para fornecer a matéria-prima $r$ para a fábrica $m$ ( $a'_{rnm} = 1$ ; caso contrário, $a'_{rnm} = 0$ ).
$h_{ri}$	Quantidade de matéria-prima $r$ necessária para produção de uma unidade do produto $i$ (kg)
$c_{rn}$	Capacidade de suprimento de matéria-prima $r$ pelo fornecedor $n$ (kg)
$d_{ij}^s$	Previsão de demanda para o produto $i$ na zona de mercado $j$ no cenário $s$ (unidade)
$f_n$	Custo fixo de avaliação e seleção do fornecedor $n$ (\$)
$f'_{um}$	Custo fixo de abertura de uma fábrica com nível de capacidade $u$ na localização $m$ (\$)
$f''_{vw}$	Custo fixo de abertura de um centro de distribuição com nível de capacidade $v$ na localização $w$ (\$)
$t_{rnm}$	Custo variável da compra de matéria-prima $r$ do fornecedor $n$ para a fábrica $m$ (\$/unidade)
$g_{im}$	Custo variável de produção de uma unidade do produto $i$ na fábrica $m$ (\$/unidade)
$g'_{ij}^s$	Custo unitário da venda perdida do produto $i$ na zona de mercado $j$ no cenário $s$ (\$/unidade)
$h'_{im}$	Tempo de processamento para produzir uma unidade do produto $i$ na fábrica $m$ (h)
$c'_{um}$	Capacidade de produção de uma fábrica com nível de capacidade $u$ na localidade $m$ (h)
$t'_{imwk}$	Custo unitário de transporte do produto $i$ da fábrica $m$ para o centro de distribuição $w$ usando o modo de transporte $k$ (\$/unidade)
$t''_{iwl}$	Custo unitário de transporte do produto $i$ do centro de distribuição $w$ para a zona de mercado $j$ usando o modo de transporte $l$ (\$/unidade)

$h_i''$	Volume de uma unidade do produto $i$ ( $m^3$ )
$c_{vw}''$	Capacidade de armazenamento do centro de distribuição com nível de capacidade $v$ na localidade $w$ ( $m^3$ )
$e_{rmn}$	Escore de desempenho ambiental do fornecedor $n$ para o fornecimento da matéria-prima $r$ na fábrica $m$ (escore)
$e'_{rmn}$	Escore de desempenho social do fornecedor $n$ para o fornecimento da matéria-prima $r$ na fábrica $m$ (escore)
$q^s$	Probabilidade de ocorrência do cenário $s$

## Variáveis de decisão

$X_n$	Variável binária que indica se o fornecedor $n$ foi selecionado ( $X_n = 1$ ) ou não ( $X_n = 0$ )
$X'_{um}$	Variável binária que indica se uma fábrica com nível de capacidade $u$ está estabelecida na localidade $m$ ( $X'_{um} = 1$ ) ou não ( $X'_{um} = 0$ )
$X''_{vw}$	Variável binária que indica se um centro de distribuição com nível de capacidade $v$ está estabelecida na localidade $w$ ( $X''_{vw} = 1$ ) ou não ( $X''_{vw} = 0$ )
$Q^s_{rnm}$	Quantidade de matéria-prima $r$ enviada do fornecedor $n$ para a fábrica $m$ no cenário $s$
$P^s_{im}$	Quantidade do produto $i$ produzido na fábrica $m$ no cenário $s$
$Y^s_{imwk}$	Quantidade de produto $i$ enviado da fábrica $m$ para o centro de distribuição $w$ por meio do modo de transporte $k$ no cenário $s$
$Y'^s_{iwjl}$	Quantidade de produto $i$ enviado do centro de distribuição $w$ para a zona de mercado $j$ por meio do modo de transporte $l$ no cenário $s$
$Y''^s_{ij}$	Quantidade de vendas perdidas do produto $i$ na zona de mercado $j$ no cenário $s$

Destaca-se que as variáveis  $X_n$ ,  $X'_{um}$  e  $X''_{vw}$  são as únicas consideradas independentes dos cenários pré-estabelecidos (portanto, a localização das facilidades não sofre influência das disrupções).

## Modelagem matemática

$$\begin{aligned}
& Min \sum_{n \in N} f_n X_n + \sum_{u \in U} \sum_{m \in M} f'_{um} X'_{um} + \sum_{v \in V} \sum_{w \in W} f''_{vw} X''_{vw} + \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} t_{rnm} Q^s_{rnm} \\
& + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} g_{im} P^s_{im} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} t'_{imwk} Y^s_{imwk} + \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} t''_{iwjvl} Y'^s_{iwjvl} + \\
& \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} g^s_{ij} Y''^s_{ij}
\end{aligned} \tag{B.79}$$

$$Max \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} e_{rmn} Q^s_{rnm} \tag{B.80}$$

$$Max \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} e'_{rmn} Q^s_{rnm} \tag{B.81}$$

Sujeito a:

$$\sum_{u \in U} X'_{um} \leq 1 \quad \forall m \in M \quad (\text{B.82})$$

$$\sum_{v \in V} X''_{vw} \leq 1 \quad \forall w \in W \quad (\text{B.83})$$

$$Q^s_{rnm} \leq a'_{rnm} X_n \quad \forall r \in R, n \in N, m \in M, s \in S \quad (\text{B.84})$$

$$\sum_{n \in N} Q^s_{rnm} = \sum_{i \in I} h_{ri} P^s_{im} \quad \forall r \in R, m \in M, s \in S \quad (\text{B.85})$$

$$P^s_{im} = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} Y^s_{imwk} \quad \forall r \in R, m \in M, s \in S \quad (\text{B.86})$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{k \in K} Y^s_{imwk} = \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} Y'^s_{ijwl} \quad \forall i \in I, w \in W, s \in S \quad (\text{B.87})$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{l \in L} Y'^s_{ijwl} + Y''^s_{ij} = d^s_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (\text{B.88})$$

$$\sum_{m \in M} Q^s_{rnm} \leq (1 - a_n^s) c_{rn} x_n \quad \forall r \in R, n \in N, s \in S \quad (\text{B.89})$$

$$\sum_{i \in I} h'_{im} P^s_{im} \leq \sum_{u \in U} c'_{um} X'_{um} \quad \forall m \in M, s \in S \quad (\text{B.90})$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} h''_{it} Y^s_{imwk} \leq \sum_{v \in V} c''_{vw} X''_{vw} \quad \forall w \in W, s \in S \quad (\text{B.91})$$

$$X_n \in \{0, 1\} \quad \forall n \in N \quad (\text{B.92})$$

$$X'_{um} \in \{0, 1\} \quad \forall u \in U, m \in M \quad (\text{B.93})$$

$$X''_{vw} \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V, w \in W \quad (\text{B.94})$$

$$Q^s_{rnm} \geq 0 \quad \forall r \in R, n \in N, m \in M, s \in S \quad (\text{B.95})$$

$$P^s_{im} \geq 0 \quad \forall i \in I, m \in M, s \in S \quad (\text{B.96})$$

$$Y^s_{imwk} \geq 0 \quad \forall i \in I, m \in M, w \in W, k \in K, s \in S \quad (\text{B.97})$$

$$Y'_{iwl}{}^s \geq 0 \quad \forall i \in I, w \in W, j \in J, l \in L, s \in S \quad (\text{B.98})$$

$$Y''_{ij}{}^s \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (\text{B.99})$$

As Equações (B.79) a (B.81) dizem respeito às Funções Objetivo econômica, ambiental e social, respectivamente. Na primeira, deseja-se determinar o desempenho da cadeia de suprimentos em termos financeiros. Dessa forma, busca-se minimizar os custos com avaliação e seleção de fornecedores, estabelecimento de fábricas e centros de distribuição, matéria-prima, produção, transporte e vendas perdidas, no cenário  $s$ .

A segunda, por sua vez, visa maximizar o escore ambiental de todos os fornecedores, no cenário  $s$ ; enquanto, a terceira busca maximizar o escore social dos fornecedores, no cenário  $s$ . Os autores explicam que as Equações (B.80) (ambiental) e (B.81) (social) têm enfoque no processo de fornecimento, mas que seria recomendável estendê-las para os centros de distribuição e fábricas para uma avaliação mais completa da cadeia de suprimentos.

As Restrições (B.82) determinam que apenas uma fábrica pode ser aberta em cada localização candidata, enquanto as Restrições (B.83) asseguram o mesmo para os centros de distribuição. As Restrições (B.84) estabelecem que uma fábrica só pode ser atendida por aqueles fornecedores a ela alocados/disponíveis, enquanto as Restrições (B.85) indicam que a demanda de matéria-prima de cada fábrica precisa ser plenamente atendida.

As Restrições (B.86) a (B.88) dizem respeito ao balanço de fluxo nas fábricas, centros de distribuição e áreas de mercado, respectivamente. Já as Restrições (B.89) a (B.91) estão associadas à limitação da capacidade dos fornecedores, fábricas e centros de distribuição, respectivamente. Por fim, as Restrições (B.92) a (B.98) fazem referência ao domínio das variáveis de decisão.

Embora o modelo de Fahimnia e Jabbarzadeh (2016) contribua para um planejamento mais sustentável da cadeia de suprimentos, os aspectos sociais e ambientais investigados se restringem ao processo de seleção do fornecedor que fará parte da rede de suprimentos. Assim, ainda que três diferentes alternativas de transporte sejam adotadas no estudo de caso (rodoviária, aquaviária e ferroviária), os impactos ambientais (e sociais) provenientes desta atividade não são considerados. Além disso, não fica claro se os impactos foram efetivamente mensurados e, a partir disso, cada fornecedor recebeu uma nota; ou as notas foram atribuídas pelos especialistas apenas com base na observação dos processos.

Dessa maneira, embora o modelo traga reflexões e incorpore aspectos relevantes para o planejamento da cadeia de suprimentos (como a possibilidade de disrupção

no processo de fornecimento e a investigação da resiliência), ele não é aderente ao contexto que investigado nesta tese. Tampouco a forma de avaliar os impactos (sociais e ambientais) poderia ser replicada ao contexto em estudo, tendo em vista foram mensurados os impactos advindos da rede transporte (e o efeito do uso de CILs nesta). Contudo, pondera-se que a análise de sensibilidade variando as importâncias relativas dos diferentes objetivos (daquele puramente econômico *versus* não-econômico) foi uma ideia replicada na Seção 4.

## B.5 Modelo de Garg et al. (2015)

Garg et al. (2015) propõem um modelo matemático de programação não-linear biobjetivo com intuito de lidar com os impactos ambientais decorrentes de uma cadeia de suprimentos fechada. Os autores explicam que há uma tendência pelo estudo de cadeias fechadas em função da dificuldade e do custo em se dispor adequadamente os resíduos de materiais eletrônicos, além do aumento no rigor relacionado ao controle de aterros sanitários.

Assim, o estudo de caso considera uma rede multicamada, com quatro elos diretos (fornecedores de matéria-prima, fábricas, centro de distribuição e clientes) e seis reversos (centros de coleta regionais, facilidade centralizada de desmonte, centro de reparo, zona de mercado de reposição, centro de decomposição e centro de disposição final). Na cadeia de suprimentos direta adotou-se o fluxo tradicional; enquanto na cadeia reversa, assumiu-se que os usuários recebem incentivos financeiros para retornar o produto, no final da sua vida útil, aos centros de coleta. Aqueles produtos que retornam são encaminhados aos centros de desmonte, onde as peças úteis são reparadas e vendidas no mercado de reposição e as demais são encaminhadas para os centros de decomposição. Nestes, separam-se os materiais recicláveis daqueles que serão destinados aos centros de disposição final.

Ressalta-se que, embora os autores defendam que estão propondo um modelo para cadeia de suprimentos “verde”, a dimensão ambiental é considerada de maneira indireta. Assume-se que ao minimizar o número total de caminhões utilizados no transporte entre os diferentes elos da cadeia de suprimentos direta, reduz-se o impacto ambiental (especificamente, na pegada de carbono). Entretanto, não se mensura o quanto, tampouco se, de fato, haveria essa redução. Determina-se, apenas, que a rota dos caminhões começam e terminam na facilidade de desmonte centralizada, sendo necessário cobrir, pelo menos, um centro de coleta e respeitar as limitações associadas à capacidade do veículo e ao comprimento da rota. O modelo de Garg et al. (2015) está definido a seguir.

### Conjuntos e índices

$I$	Conjunto de fornecedores de matéria-prima, onde $i \in I$
$J$	Conjunto de fábricas, onde $j \in J$
$K$	Conjunto de centros de distribuição, onde $k \in K$
$L$	Conjunto de zonas de consumo, onde $l \in L$
$C$	Conjunto de centros de coleta, onde $c \in C$
$S$	Conjunto de zonas de mercado de reposição, onde $s \in S$
$p$	Índice das facilidades de desmonte
$q$	Índice dos centros de reparo
$f$	Índice dos centros de disposição final
$D$	Índice dos centros de decomposição
$R$	Conjunto de matérias-primas, onde $r \in R$
$M$	Conjunto de componentes, onde $m \in M$
$VI$	Conjunto de veículos no nós $i$ (fornecedor de matéria-prima), onde $i \in I$ e $vi \in VI$
$VJ$	Conjunto de veículos no nós $j$ (fábrica), onde $j \in J$ e $vj \in VJ$
$VK$	Conjunto de veículos no nós $k$ (centro de distribuição), onde $k \in K$ e $vk \in VK$
$T$	Conjunto de veículos no fabricante $t$ , onde $t \in T$

## Parâmetros

$Pur_i^r$	Custo unitário de compra do material $r$ no fornecedor $i$
$Prod_{mj}$	Custo de produção do componente $m$ na fábrica $j$
$Ass_j$	Custo de montagem do produto na fábrica $j$
$OP_k$	Custo unitário de operação no centro de distribuição $k$
$BB$	Incentivo pago ao consumidor pelo retorno do produto, independente do seu estado de conservação
$Dis$	Custo unitário de desmonte
$Rep_m$	Custo unitário de reparo do componente $m$
$Dec_r$	Custo de produção da matéria-prima $r$ oriundo do processo de decomposição
$H^{vi}$	Custo de contratação do veículo $vi$ no fornecedor
$H^{vj}$	Custo de contratação do veículo $vj$ na fábrica
$hH^{vk}$	Custo de contratação do veículo $vk$ no centro de distribuição
$TC$	Custo por milha transportada dos centros de coleta ao centro de desmonte
$TC_m^{pq}$	Custo de transporte de uma unidade do componente $m$ da facilidade de desmonte para o centro de reparo
$TC_{ms}$	Custo de transporte de uma unidade do componente $m$ do centro de reparo para a zona de mercado de reposição
$TC_m^{pd}$	Custo de transporte de uma unidade do componente $m$ da facilidade de desmonte para o centro de decomposição
$TC_r^{di}$	Custo de transporte, por kg, do material $r$ do centro de decomposição para o fornecedor $i$
$D_l$	Demanda da zona de consumo $l$
$D_m^s$	Demanda do componente $m$ no mercado de reposição $s$
$\alpha$	Taxa de retorno
$W$	Peso unitário do produto final embalado
$\beta_m$	Taxa de utilização do componente $m$ no produto
$\gamma_m$	Taxa de reparo do componente $m$
$\eta_r$	Taxa de reciclagem da matéria-prima $r$ depois da decomposição



$\mu_m^r$	Taxa de utilização do material $r$ por unidade de componente $m$
$W_r$	Peso por unitário do material $r$
$SP_l$	Preço unitário de venda do produto na zona de consumo $l$
$RSP_m$	Preço unitário de venda do componente $m$ no mercado de reposição $s$
$Rev_r$	Receita gerada por uma unidade de material $r$ por conta da reciclagem
$Rcap_{ir}$	Capacidade do fornecedor $i$ fornecer o material $r$
$Pcap_j$	Capacidade de produção da fábrica $j$
$Cap_{vi}$	Capacidade (em kg) do caminhão $vi$ no fornecedor
$Max_{vi}$	Número máximo de caminhões do tipo $vi$ disponível no fornecedor
$NCap_{vj}$	Capacidade (em unidades) do caminhão $vi$ na fábrica
$WCap_{vj}$	Capacidade (em kg) do caminhão $vi$ na fábrica
$Max_{vj}$	Número máximo de caminhões do tipo $vj$ disponível na fábrica
$NCap_{vk}$	Capacidade (em unidades) do caminhão $vk$ no centro de distribuição
$WCap_{vk}$	Capacidade (em kg) do caminhão $vi$ no centro de distribuição
$Max_{vk}$	Número máximo de caminhões do tipo $vj$ disponível no centro de distribuição
$D_{cc}$	Distância entre dois centros de coleta quaisquer
$D_{pc}$	Distância entre a facilidade de desmonte e o centro de coleta $c$

## Variáveis de decisão

$A_{lc}$	Variável binária que indica se o centro de coleta $c$ está aberto na zona de mercado consumidor $l$ para coletar os produtos de retorno ( $A_{lc} = 1$ ) ou não ( $A_{lc} = 0$ )
$hB_{kl}$	Variável binária que indica se a zona de mercado consumidor $l$ é atendida pelo centro de distribuição $k$ ( $B_{kl} = 1$ ) ou não ( $B_{kl} = 0$ )
$L_{ij}^{vi}$	Variável binária que indica se há um link de transporte estabelecido entre o fornecedor de matéria-prima $i$ e a fábrica $j$ pelo modo de transporte $vi$ ( $L_{ij}^{vi} = 1$ ) ou não ( $L_{ij}^{vi} = 0$ )
$L_{jk}^{vj}$	Variável binária que indica se há um link de transporte estabelecido entre a fábrica $j$ e o centro de distribuição $k$ pelo modo de transporte $vj$ ( $L_{jk}^{vj} = 1$ ) ou não ( $L_{jk}^{vj} = 0$ )
$L_{kl}^{vk}$	Variável binária que indica se há um link de transporte estabelecido entre o centro de distribuição $k$ e a zona consumidora $l$ pelo modo de transporte $vk$ ( $L_{kl}^{vk} = 1$ ) ou não ( $L_{kl}^{vk} = 0$ )
$Y_{cc}$	Variável binária que indica se o centro de coleta $c$ é o sucessor do centro de coleta $p$ ( $Y_{cc} = 1$ ) ou não ( $Y_{cc} = 0$ )
$Y_{pc}$	Variável binária que indica se o centro de coleta $c$ é o sucessor da facilidade de desmonte $p$ ( $Y_{pc} = 1$ ) ou não ( $Y_{pc} = 0$ )
$Y_{cp}$	Variável binária que indica se a facilidade de desmonte $p$ é sucessora do centro de coleta $c$ ( $Y_{cp} = 1$ ) ou não ( $Y_{cp} = 0$ )
$Y_{ct}$	Variável binária que indica se o centro de coleta $c$ é atendido pelo caminhão $t$ ( $Y_{ct} = 1$ ) ou não ( $Y_{ct} = 0$ )
$X_{ijr}^{vi}$	Quantidade do material $r$ enviado do fornecedor $i$ para a fábrica $j$ por meio do caminhão $vi$
$X_{ik}^{vj}$	Quantidade do produto enviado da fábrica $j$ para o centro de distribuição $k$ por meio do caminhão $vj$
$X_{kl}^{vk}$	Quantidade de produto enviado do centro de distribuição $k$ para a zona de consumo $l$ por meio do caminhão $vk$
$X_{lc}$	Quantidade do produto usado (no fim da vida) que retorna da zona de consumo $l$ para o centro de coleta $c$

$X_c$	Quantidade de produto enviado do centro de coleta $c$ para a facilidade de desmonte
$XPQ_m$	Quantidade do componente $m$ enviado da facilidade de desmonte para o centro de reparo $q$
$XQS_m$	Quantidade do componente $m$ enviado do centro de reparo $q$ para o mercado de reposição $s$
$XPD_m$	Quantidade do componente $m$ enviado da facilidade de desmonte para o centro de decomposição
$XDI_i^r$	Quantidade do material $r$ enviado do centro de decomposição para o fornecedor $i$
$XDF_r$	Quantidade do material $r$ enviado do centro de decomposição para o centro de disposição final
$N_{vi}$	Número de veículos do tipo $vi$ contratados pelo fornecedor $i$
$N_{vj}$	Número de veículos do tipo $vj$ contratados pelo fábrica $j$
$N_{vk}$	Número de veículos do tipo $vk$ contratados pelo centro de distribuição $k$

## Modelagem matemática

$$Z1 = \sum_l \sum_k \sum_{vk} SP_l X_{kl}^{vk} + \sum_s \sum_m RSP_m X_s^m + \sum_i \sum_r Rev_r XDI_i^r \quad (B.100)$$

$$\begin{aligned} Z2 = & \sum_{vi} \sum_r \sum_j \sum_i Pur_i^r X_{ijr}^{vi} + \sum_m \sum_j \sum_{vj} Prod_{mj} X_{jk}^{vj} \beta_m + \sum_j \\ & \times \sum_{vj} Ass_j X_{jk}^{vj} + \sum_{vk} \sum_k \sum_l Op_k X_{kl}^{vk} + \sum_l \sum_c BBX_{lc} \\ & + \sum_c Dis X_c + \sum_m Rep_m XPQ_m + \sum_r Dec_r XDI_i^r \end{aligned} \quad (B.101)$$

$$\begin{aligned} Z3 = & \sum_{vi} H^{vi} N_{vi} L_{ij}^{vi} + \sum_{vj} H^{vj} N_{vj} L_{jk}^{vj} + \sum_{vk} H^{vk} N_{vk} L_{kl}^{vk} \\ & + \sum_t TC \left( \sum_p \sum_c D_{pc} Y_{pc} Y_{ct} + \sum_c \sum_c D_{cc} Y_{cc} Y_{ct} \right. \\ & \left. \sum_c \sum_p D_{pc} Y_{cp} \right) + \sum_m TC_m^{pq} XPQ_m + \sum_s \sum_m TC_{ms} XQS_m \\ & \sum_m TC_m^{pd} XPD_m + \sum_i \sum_r TC_r^{di} XDI_i^r \end{aligned} \quad (B.102)$$

$$Max f_1 = Z1 - Z2 - Z3 \quad (B.103)$$

$$Min f_2 = \sum_{vi} N_{vi} + \sum_{vj} N_{vj} + \sum_{vk} N_{vk} \quad (B.104)$$

Sujeito a:

$$\sum_{vi} \sum_i X_{ijr}^{vi} = \sum_{vj} \sum_m \sum_k \mu_r^m \beta_m X_{jk}^{vj} \quad \forall r, j \quad (\text{B.105})$$

$$\sum_{vi} \sum_j X_{ijr}^{vi} \leq Rcap_{ir} \quad \forall r, i \quad (\text{B.106})$$

$$\sum_{vj} \sum_j X_{jk}^{vj} = \sum_{vk} \sum_l X_{kl}^{vk} \quad \forall k \quad (\text{B.107})$$

$$\sum_{vj} \sum_k X_{jk}^{vj} \leq Pcap_j \quad \forall j \quad (\text{B.108})$$

$$\sum_{vk} \sum_k X_{kl}^{vk} \geq D_l \quad \forall l \quad (\text{B.109})$$

$$\sum_c X_{lc} = \alpha * D_l \quad \forall l \quad (\text{B.110})$$

$$X_c = \sum_l X_{lc} \quad \forall c \quad (\text{B.111})$$

$$XPQ_m = \sum_c \gamma_m \beta_m X_c \quad \forall m \quad (\text{B.112})$$

$$XQS_m \leq D_s^m \quad \forall s, m \quad (\text{B.113})$$

$$XPD_m = \sum_c (1 - \gamma_m) \beta_m X_c \quad \forall m \quad (\text{B.114})$$

$$\sum_i XDI_i^r = \sum_m \eta_r \mu_r^m XPD_m \quad \forall r \quad (\text{B.115})$$

$$\sum_{vk} X_{kl}^{vk} \leq MI * B_{kl} \quad \forall k, l \quad (\text{B.116})$$

$$X_{lc} \leq MI * A_{lc} \quad \forall l, c \quad (\text{B.117})$$

$$\sum_r \sum_j \sum_i X_{ijr}^{vi} W_r \leq N_{vi} Cap^{vi} \quad \forall vi \quad (\text{B.118})$$

$$N_{vi} \leq Max_{vi} \quad \forall vi \quad (\text{B.119})$$

$$\sum_k \sum_j X_{jk}^{vj} \leq NCap_{vj} * N_{vj} \quad \forall vj \quad (\text{B.120})$$

$$\sum_k \sum_j X_{jk}^{vj} \leq WC_{ap_{vj}} * N_{vj} \quad \forall vj \quad (\text{B.121})$$

$$N_{vj} \leq Max_{vj} \quad \forall vj \quad (\text{B.122})$$

$$\sum_l \sum_k X_{kl}^{vk} \leq NC_{ap_{vk}} * N_{vk} \quad \forall vk \quad (\text{B.123})$$

$$\sum_l \sum_k X_{kl}^{vk} \leq WC_{ap_{vk}} * N_{vk} \quad \forall vk \quad (\text{B.124})$$

$$N_{vk} \leq Max_{vk} \quad \forall vk \quad (\text{B.125})$$

$$WR_c = \sum_l X_{lc} W \quad \forall c \quad (\text{B.126})$$

$$\begin{aligned} \sum_p \sum_c D_{pc} Y_{pc} Y_{ct} + \sum_c \sum_c D_{cc} Y_{pc} Y_{ct} + \sum_c \sum_p D_{cp} Y_{cp} \\ \leq MD_t \quad \forall t \end{aligned} \quad (\text{B.127})$$

$$\sum_c WR_c Y_{ct} \leq MW_t \quad \forall t \quad (\text{B.128})$$

$$\sum_p \sum_t Y_{pc} Y_{ct} + \sum_c \sum_t Y_{cc} Y_{ct} = 1 \quad \forall c \quad (\text{B.129})$$

$$\sum_p \sum_c Y_{pc} Y_{ct} = 1 \quad \forall t \quad (\text{B.130})$$

$$\sum_c \sum_p Y_{cp} Y_{ct} = 1 \quad \forall t \quad (\text{B.131})$$

$$L_{ij}^{vi} \leq \sum_r X_{ijr}^{vi} \quad \forall i, j, vi \quad (\text{B.132})$$

$$L_{jk}^{vj} \leq X_{jk}^{vj} \quad \forall j, k, vj \quad (\text{B.133})$$

$$L_{kl}^{vk} \leq X_{kl}^{vk} \quad \forall k, l, vk \quad (\text{B.134})$$

$$\sum_r X_{ijr}^{vi} \leq MI * L_{ij}^{vi} \quad \forall i, j, vi \quad (\text{B.135})$$

$$X_{jk}^{vj} \leq MI * L_{jk}^{vj} \quad \forall j, k, vj \quad (\text{B.136})$$

$$V_{kl}^{vk} \leq MI * L_{kl}^{vk} \quad \forall j, k, vj \quad (\text{B.137})$$

$$B_{kl}, A_{lc}, Y_{pc}, Y_{ct}, Y_{cp}, Y_{cc}, L_{ij}^{vi}, L_{jk}^{vj}, L_{kl}^{vk} \in \{0, 1\} \forall i, j, k, vi, vj, vk, l, c, t, p \quad (\text{B.138})$$

$$\begin{aligned} X_{ijr}^{vi}, X_{jk}^{vk}, X_{lc}, X_c, X_{PQm}, X_{QS_m}, X_{PD_m}, X_{DI_i^r}, N_{vi}, N_{vj}, N_{vk} \\ \geq 0 \text{ e inteiro} \quad \forall i, j, k, vi, vj, vk, r, m, l, c \end{aligned} \quad (\text{B.139})$$

A Função Objetivo (B.103) busca maximizar o lucro total gerado na cadeia de suprimentos. Para tanto, consideram-se: (i) as receitas de venda no mercado consumidor, no mercado de peças de reposição e as economias advindas da reciclagem e reutilização do material nas operações de manufatura (Equações (B.100)); (ii) os custos operacionais da cadeia de suprimentos (Equações (B.101)); e (iii) os custos de transporte (Equações (B.102)).

A Função Objetivo (B.104) em que se busca minimizar o número de caminhões contratados para realizar as atividades de transporte na cadeia direta. Os autores explicam que, assim, pode-se reduzir a pegada de carbono associada às emissões.

As Restrições (B.105) a (B.117) são de balanço de fluxo. As Restrições (B.105) indicam que a quantidade de matéria-prima enviada do fornecedor para a fábrica depende do processo de manufatura (e.g. número de componentes fabricados). Já as Restrições (B.106) asseguram que a quantidade de cada matéria-prima enviada por qualquer fornecedor não pode exceder sua capacidade de suprimento.

As Restrições (B.107) determinam que o fluxo de entrada e saída nos centros de distribuição deve ser igual, ou seja, não há formação de estoque. Já as Restrições (B.108) indicam que o fluxo de produtos oriundo de cada fábrica não pode exceder sua capacidade de produção, enquanto as Restrições (B.109) asseguram que toda a demanda do mercado consumidor precisará ser atendida.

As Restrições (B.110) representam a relação entre a demanda e a quantidade de produtos que retornam, após o uso, das zonas de consumo para os centros de coleta; enquanto as Restrições (B.111) são usadas para o cálculo da quantidade de produtos que retornam a cada centro de coleta. Já as Restrições (B.112) apresentam o fluxo de cada componente da facilidade de desmonte ao centro de reparo, enquanto as Restrições (B.113) indicam que o centro de reparo não é obrigado a satisfazer a demanda do mercado de peças de reposição.

As Restrições (B.114) determinam que cada tipo de componente restante na facilidade de decomposição deve ser encaminhado para o centro de decomposição para ser processado (separação do material reciclável e não reciclável). Neste contexto, as Restrições (B.115) identificam a quantidade de material que será decomposta em relação a quantidade total de material que chega ao centro de decomposição.

Por fim, as Restrições (B.116) determinam que um centro de distribuição só pode atender um mercado consumidor que tenha sido a ele alocado; enquanto as Restrições (B.117) asseguram que os centros de coleta só poderão receber os produtos retornados de zonas de consumo a eles alocados.

No que diz respeito à capacidade de transporte, têm-se as Restrições (B.118) a (B.125). As Restrições (B.118) indicam que a capacidade máxima do caminhão  $vi$  usado no fornecedor  $i$  deve ser respeitada; enquanto as Restrições (B.119) determinam que o número de caminhões  $vi$  requisitados pelo fornecedor não pode exceder o número de caminhões disponíveis.

As Restrições (B.120) a (B.122) fazem a mesma assunção para as fábricas (capacidade em termos de unidade e peso, além da disponibilidade) e as Restrições (B.123) a (B.125) determinam o mesmo para os centros de distribuição.

Ainda sobre transporte, as Restrições (B.126) a (B.131) dizem respeito às rotas entre os centros de coleta e desmonte. As Restrições (B.126) calculam o peso total dos produtos devolvidos no centro de coleta, enquanto as Restrições (B.127) e (B.128) asseguram que a distância e a capacidade máxima da rota não devem exceder a distância e a capacidade alocada ao caminhão, respectivamente.

As Restrições (B.129) impõem que cada centro de coleta precisa ser atendido e deve pertencer a apenas uma rota. Restrições (B.130) e (B.131) exigem que toda rota comece e termine na facilidade de desmonte.

Quanto aos *links*, as Restrições (B.132) a (B.134) asseguram que duas localidades só podem ser conectadas por meio de caminhões, através de *links* de transporte existentes na cadeia de suprimentos direta. Já as Restrições (B.135) a (B.137) asseguram que não haja transporte entre duas localidades não conectadas (para cada tipo de veículo) na cadeia de suprimentos direta. Por fim, as Restrições (B.139) e (B.139) dizem respeito ao domínio das variáveis de decisão.

Verifica-se que o modelo de Garg et al. (2015) tem um enfoque diferente da presente tese, uma vez que considera multicamadas de uma cadeia de suprimentos fechada. Além disso, prioriza-se à alocação, tendo em vista que a localização da maioria das facilidades é conhecida e pré-fixada (com exceção do centro de coleta). Ainda, considera-se como única possibilidade o transporte por meio de caminhões (de diferentes capacidades), não sendo avaliada a intermodalidade (nem mesmo o uso de alternativas de transporte de maior capacidade na parte de suprimentos da cadeia).

Enfatiza-se que a dimensão ambiental é avaliada de maneira indireta, uma vez que não há nenhuma restrição que aborde diretamente o tema. Os autores defendem que a segunda função objetivo proporciona uma redução na pegada de carbono da empresa, mas isso não é quantificado. Assume-se, apenas, que um menor número de caminhões circulando reflete em menor emissão de carbono (o que é questionável, especialmente diante de trabalhos que analisam o ciclo de vida).

Dessa forma, o trabalho de Garg et al. (2015) reforça a discussão feita em capítulos anteriores sobre a dificuldade em mensurar a dimensão ambiental. Esta dificuldade talvez tenha motivado os autores a adotarem uma estratégia que, embora talvez não seja a ideal, demonstra a preocupação da literatura da área com a incorporação dos impactos ambientais nos modelos matemáticos. Salienta-se, contudo que, nesta, o impacto ambiental foi mensurado de maneira a avaliar a contribuição da instalação de CILs na rede logística brasileira.

## B.6 Modelo de Santibañez-Aguilar et al. (2014)

Santibañez-Aguilar et al. (2014) apresentam um modelo de otimização para planejamento e *design* de uma cadeia de suprimentos sustentável para biorrefinarias. Deseja-se maximizar o lucro da cadeia de suprimentos (viés econômico) e, ao mesmo tempo, minimizar os impactos ambientais e maximizar o número de empregos gerados (viés social). Apesar deste modelo aplicar a ACV (usando o *EcoIndicator* do *software* GaBi) para avaliar o impacto ambiental, optou-se por detalhá-lo uma vez que os autores incorporam, também, a dimensão social na modelagem matemática.

O estudo de caso considera uma cadeia de suprimentos que produz biocombustíveis e outros produtos químicos derivados de matérias-primas oriundas de biomassa. Quanto aos fluxos, a matéria-prima comprada é transportada dos locais de colheita até as plantas de processamento que irão transformá-la em diferentes produtos (e.g. etanol e biodiesel). Estes podem ser vendidos para o consumidor final ou destinados ao processamento como insumo de outras indústrias.

Quanto à transformação, adotam-se dois tipos de planta de produção: (i) uma central com maior capacidade, destinada a produção de todos os tipos de produtos (que deverá estar próxima às zonas industriais); e, (ii) um conjunto de plantas menores com capacidade limitada (próxima às zonas de colheita). Assume-se, também, que todas as plantas podem adotar diferentes tipos de tecnologia para produção.

Assim, as decisões de localização estão associadas à definição da combinação ótima de fábricas a serem abertas, considerando: os potenciais locais para instalação, a capacidade produtiva, o tipo de tecnologia empregada, os tipos de matéria-prima oriunda de biomassa recebidas e tipos de produtos processados em cada fábrica, bem como os *links* de transporte existentes. Já as decisões de alocação dizem respeito à

quantidade produzida em cada fábrica selecionada, bem como aos fluxos de materiais entre os campos de colheita, fábricas e mercados consumidores.

Consideram-se como alternativas de transporte: (i) caminhões, para o transporte primário de matéria-prima às plantas de produção e para o transporte intermediário entre as diferentes plantas; e (ii) dutos, para o transporte das plantas ao mercado consumidor. Entretanto, a alternativa de transporte é fixa, não havendo opção de escolha modal (não há um índice para isto); tampouco, a possibilidade de intermodalidade.

O modelo matemático proposto por Santibañez-Aguilar et al. (2014) está definido a seguir. A dimensão ambiental é tratada na Função Objetivo (B.141) e a social é abordada na Função Objetivo (B.142).

### Conjuntos e índices

$M$	Conjunto de matérias-primas, onde $m \in M$
$K$	Conjunto de produtos, onde $k \in K$
$R$	Conjunto de rotas de processamento, onde $r \in R$
$H$	Conjunto de áreas de plantação/colheita, onde $h \in H$
$PH$	Conjunto de plantas secundárias de processamento, onde $ph \in PH$
$MK$	Conjunto de mercados, onde $mk \in MK$
$T$	Conjunto de períodos de tempo, onde $t \in T$

### Parâmetros

$\alpha_{m,k,r}$	Fator de eficiência da conversão da matéria-prima $m$ no produto $k$ por meio de uma rota de processamento (razão entre quantidade produzida e a matéria-prima usada)
$Ck_{m,mk,t}^{sold}$	Custo unitário do produto $k$ no mercado $mk$ no período de tempo $t$ (em \$/tonelada)
$Cm_{m,h,t}^{produced}$	Custo unitário da produção da matéria-prima $m$ na área de plantio $h$ no período de tempo $t$ (em \$/tonelada)
$Cm_{m,h}^{storage\ main}$	Custo de estocagem da matéria-prima $m$ na área de plantio $h$ (em \$)
$Cm_{m,ph}^{storage\ plant}$	Custo de estocagem da matéria-prima $m$ na planta secundária $ph$ (em \$)
$Cm_m^{storage\ main}$	Custo de estocagem da matéria-prima $m$ na planta principal (em \$)
$Ck_{k,ph}^{storage\ plant}$	Custo de estocagem do produto $k$ na planta $ph$ (em \$)
$Ck_k^{storage\ main}$	Custo de estocagem do produto $k$ na planta principal (em \$)
$Ck_{k,mk}^{storage\ market}$	Custo de estocagem do produto $k$ no mercado $mk$ (em \$)
$Ctm_{m,h,ph,t}^{harvest. sites - plant}$	Custo unitário de transporte da matéria-prima $m$ da área de plantio $h$ para a planta secundária $ph$ no período de tempo $t$ (em \$/tonelada)



$Ctm_{m,h,t}^{\text{harvest. sites - main}}$	Custo unitário de transporte da matéria-prima $m$ da área de plantio $h$ para a planta principal no período de tempo $t$ (em \$/tonelada)
$Ctk_{k,ph,mk,t}^{\text{plant-market}}$	custo unitário de transporte do produto $k$ da planta secundária $ph$ para o mercado $mk$ no período de tempo $t$ (em \$/tonelada)
$Ctk_{k,ph,t}^{\text{plant-main}}$	Custo unitário de transporte do produto $k$ da planta secundária $ph$ para a planta principal no período de tempo $t$ (em \$/tonelada)
$Ctk_{k,mk,t}^{\text{main-market}}$	Custo unitário de transporte do produto $k$ da planta principal para o mercado $mk$ no período de tempo $t$ (em \$/tonelada)
$C_{m,k,r,ph,t}^{\text{processing}}$	Custo unitário de processamento para produção do produto $k$ a partir da matéria-prima $m$ por meio da rota de processamento $r$ na planta secundária $ph$ no período de tempo $t$ (em \$/tonelada)
$C_{m,k,r,t}^{\text{processing main}}$	Custo unitário de processamento para produção do produto $k$ a partir da matéria-prima $m$ por meio da rota de processamento $r$ na planta principal no período de tempo $t$ (em \$/tonelada)
$EcoInd_k^{\text{product}}$	Eco-Indicador99 associado ao uso do produto $k$ (Eco-indicador99/tonelada produzida)
$EcoInd_m^{\text{raw material}}$	Eco-Indicador99 associado à produção da matéria-prima $m$ (Eco-indicador99/tonelada de matéria-prima)
$EcoIndm_{m,h,ph}^{\text{harvest. sites - plant}}$	Eco-Indicador99 associado ao transporte da matéria-prima $m$ da área de plantio $h$ para a planta secundária $ph$ (Eco-indicador99/tonelada de matéria-prima)
$EcoIndm_{m,h}^{\text{harvest. sites - main}}$	Eco-Indicador99 associado ao transporte da matéria-prima $m$ da área de plantio $h$ para a planta principal (Eco-indicador99/tonelada de matéria-prima)
$EcoIndk_{k,ph,mk}^{\text{plant-market}}$	Eco-Indicador99 associado ao transporte do produto $k$ da planta secundária $ph$ para o mercado $mk$ (Eco-indicador99/tonelada produzida)
$EcoIndk_{k,ph}^{\text{plant-main}}$	Eco-Indicador99 associado ao transporte do produto $k$ da planta secundária $ph$ para a planta principal (Eco-indicador99/tonelada produzida)
$EcoIndk_{k,mk}^{\text{plant-market}}$	Eco-Indicador99 associado ao transporte do produto $k$ da planta principal para o mercado $mk$ (Eco-indicador99/tonelada produzida)
$EcoInd_{m,k,r,ph,t}^{\text{processing}}$	Eco-Indicador99 associado à produção do produto $k$ a partir da matéria-prima $m$ por meio da rota de processamento $r$ no período de tempo $t$ na planta secundária $ph$ (Eco-indicador99/tonelada de matéria-prima)
$EcoInd_{m,k,r,t}^{\text{processing main}}$	Eco-Indicador99 associado à produção do produto $k$ a partir da matéria-prima $m$ por meio da rota de processamento $r$ no período de tempo $t$ na planta principal (Eco-indicador99/tonelada de matéria-prima)
$M_{m,h,t}^{\text{upper produced}}$	Produção máxima da matéria-prima $m$ que pode ser obtida na área de plantio $h$ no período de tempo $t$ (tonelada/mês)
$P_{k,mk,t}^{\text{demand}}$	Demanda do produto $k$ no mercado $mk$ ao final do período $t$ (tonelada/mês)

$P_{m,k,r,l}^{upper}$	Limite superior de processamento da matéria-prima $m$ no produto $k$ por meio da rota de processamento $r$ na localidade $l$
$P_{m,k,r,l}^{lower}$	Limite inferior de processamento da matéria-prima $m$ no produto $k$ por meio da rota de processamento $r$ na localidade $l$
$Sm_{s,l}^{upperl}$	Limite superior de estocagem da matéria-prima $m$ na localidade $l$ (em tonelada)
$Sm_{s,l}^{lowerl}$	Limite inferior de estocagem da matéria-prima $m$ na localidade $l$ (em tonelada)
$SI_m^{raw\ material}$	Empregos gerados para produção da matéria-prima $m$ (em empregos/tonelada)
$SI_{m,h,ph}^{harvesting\ sites - plant}$	Empregos gerados para transportar a matéria-prima $m$ da área de plantio $h$ para a planta secundária $ph$ (em empregos/tonelada)
$SI_{m,h}^{harvesting\ sites - main}$	Empregos gerados para transportar a matéria-prima $m$ da área de plantio $h$ para a planta principal (em empregos/tonelada)
$SI_{m,ph}^{plant-main}$	Empregos gerados para transportar a matéria-prima $m$ da planta secundária $ph$ para a planta principal (em empregos/tonelada)
$SI_{k,ph}^{plant-main}$	Empregos gerados para transportar o produto $k$ da planta secundária $ph$ para a planta principal (em empregos/tonelada)
$SI_{k,ph,mk}^{plant-market}$	Empregos gerados para transportar o produto $k$ da planta secundária $ph$ para o mercado $mk$ (em empregos/tonelada)
$SI_{k,mk}^{main-market}$	Empregos gerados para transportar o produto $k$ da planta principal para o mercado $mk$ (em empregos/tonelada)
$SI_{m,k,r,ph,t}^{processing}$	Empregos gerados para produzir o produto $k$ a partir da matéria-prima $m$ por meio da rota de processamento $r$ no período de tempo $t$ , na planta secundária (em empregos/tonelada)
$SI_{m,k,r,t}^{processing\ main}$	Empregos gerados para produzir o produto $k$ a partir da matéria-prima $m$ por meio da rota de processamento $r$ no período de tempo $t$ , na planta principal (em empregos/tonelada)

Destaca-se que os parâmetros  $M_{m,h,ph}^{lower\ harvesting\ sites-plant}$ ,  $M_{m,h}^{lower\ harvesting\ sites-main}$  e  $M_{m,ph}^{lower\ plant-main}$  não foram definidos pelos autores.

### Variáveis de decisão

$M_{m,h,t}^{harvesting\ sites}$	Matéria-prima $m$ acumulada ao final do período $t$ na área de plantio $h$ (em tonelada/mês)
$M_{m,h,t}^{produced}$	Matéria-prima $m$ produzida na área de plantio $h$ , ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$M_{m,h,ph,t}^{harvesting\ sites - plant}$	Matéria-prima $m$ transportada da área de plantio $h$ para a planta secundária $ph$ , ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$M_{m,h,t}^{harvesting\ sites - plant}$	Matéria-prima $m$ transportada da área de plantio $h$ para a planta principal, ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$M_{m,ph,t}^{plant}$	Matéria-prima $m$ acumulada ao final do período $t$ , na planta secundária $ph$ (em tonelada/mês)
$Me_{m,h,ph,t}^{harvesting\ sites - plant}$	Matéria-prima $m$ enviada da área de plantio $h$ para a planta secundária $ph$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)

$M_{m,k,r,ph,t}^{processing}$	Matéria-prima $m$ processada na planta secundária $ph$ por meio da rota de produção $r$ para produzir o produto $k$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$M_{m,t}^{main}$	Matéria-prima $m$ acumulada ao final do período $t$ na planta principal (em tonelada/mês)
$Me_{m,ph,t}^{plant-main}$	Matéria-prima $m$ enviada da planta secundária $ph$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$Me_{m,h,t}^{harvesting\ sites - main}$	Matéria-prima $m$ enviada da área de plantio $h$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$M_{m,k,r,t}^{processing\ main}$	Matéria-prima $m$ processada na planta principal por meio da rota de processamento $r$ para produzir o produto $k$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$P_{k,ph,t}^{plant}$	Produto $k$ acumulado na planta secundária $ph$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$P_{m,k,r,ph,t}^{produced}$	Produto $k$ produzido a partir da matéria-prima $m$ por meio da rota de processamento $r$ na planta secundária $ph$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$P_{k,t}^{main}$	Produto $k$ acumulado na planta principal ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$P_{m,k,r,t}^{produced-main}$	produto $k$ produzido a partir da matéria-prima $m$ por meio da rota de processamento $r$ na planta principal ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$Pe_{k,ph,t}^{plant-main}$	Produto $k$ enviado da planta secundária $ph$ para a planta principal ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$P_{k,mk,t}^{main-market}$	Produto $k$ transportado da planta principal para o mercado $mk$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$Pe_{k,ph,mk,t}^{plant-market}$	Produto $k$ enviado da planta secundária $ph$ para o mercado $mk$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$Pe_{k,mk,t}^{main-market}$	Produto $k$ enviado da planta principal ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$P_{k,mk,t}^{sold}$	Produto $k$ vendido no mercado $mk$ ao final do período $t$ (em tonelada/mês)
$S_{s,l,t}^l$	Material $s$ armazenado na localidade $l$ no período $t$ (em tonelada/mês)
$ys_{s,l}^{l\ necessary}$	Variável binária que indica se o estoque do material $s$ é necessário na localidade $l$ em qualquer período de tempo $t$ ( $ys_{s,l}^{l\ necessary} = 1$ ) ou não ( $ys_{s,l}^{l\ necessary} = 0$ )
$ys_{s,l,t}^l$	Variável binária que indica se o estoque do material $s$ é necessário na localidade $l$ em um período específico de tempo $t$ ( $ys_{s,l,t}^l = 1$ ) ou não ( $ys_{s,l,t}^l = 0$ )
$y_{m,l1,l2,t}$	Variável binária que indica se o transporte do material $m$ é feito da localidade $l1$ para a $l2$ em um período específico de tempo $t$ ( $y_{m,l1,l2,t} = 1$ ) ou não ( $y_{m,l1,l2,t} = 0$ )
$y_{m,k,r,l,t}$	Variável binária que indica se o processamento na localidade $l$ é necessário para produzir o produto $k$ a partir da matéria-prima $m$ pela rota de processamento $k$ em um período específico de tempo $t$ ( $y_{m,k,r,l,t} = 1$ ) ou não ( $y_{m,k,r,l,t} = 0$ )

$y_{pm_{m,h,t}}$	Variável binária que indica se a produção da matéria-prima $m$ na área de plantio $h$ é necessária em qualquer período de tempo $t$ ( $y_{pm_{m,h,t}} = 1$ ) ou não ( $y_{pm_{m,h,t}} = 0$ )
$Y_{s^l_{s,l,t}}$	Variável booleana que indica se o estoque do material $s$ é necessário na localidade $l$ em um período específico de tempo $t$ ( $Y_{s^l_{s,l,t}} = 1$ ) ou não ( $Y_{s^l_{s,l,t}} = 0$ )

## Modelagem matemática

$$\begin{aligned}
Max \quad profit = & \sum_k \sum_{mk} \sum_t Ck_{k,mk,t}^{sold} P_{k,mk,t}^{sold} - \sum_m \sum_h \sum_t Cm_{m,h,t}^{produced} M_{m,h,t}^{produced} \\
& - \sum_m \sum_h Cm_{m,h}^{storage \text{ main}} - \sum_m \sum_{ph} Cm_{m,ph}^{storage \text{ plant}} - \sum_m Cm_m^{storage \text{ main}} \\
& - \sum_k \sum_{ph} Ck_{k,ph}^{storage \text{ plant}} - \sum_k Ck_k^{storage \text{ main}} - \sum_k \sum_{mk} Ck_{k,mk}^{storage \text{ market}} \\
& \sum_m \sum_h \sum_{ph} \sum_t Ctm_{m,h,ph,t}^{harvast \text{ sites - plant}} M_{m,h,ph,t}^{harvast \text{ sites - plant}} \\
& - \sum_m \sum_h \sum_t Ctm_{m,h,t}^{harvast \text{ sites - main}} M_{m,h,t}^{harvast \text{ sites - main}} \\
& - \sum_k \sum_{ph} \sum_{mk} \sum_t Ctk_{k,ph,mk,t}^{plant - market} P_{k,ph,mk,t}^{plant - market} \\
& - \sum_k \sum_{ph} \sum_t Ctk_{k,ph,t}^{plant - main} P_{k,ph,t}^{plant - main} - \sum_k \sum_{mk} \sum_t Ctk_{k,mk,t}^{main - market} P_{k,mk,t}^{main - market} \\
& - \sum_m \sum_k \sum_r \sum_{ph} \sum_t C_{m,k,r,ph,t}^{processing} M_{m,k,r,ph,t}^{processing} - \sum_m \sum_k \sum_r \sum_t C_{m,k,r,t}^{processing \text{ main}} M_{m,k,r,t}^{processing \text{ main}}
\end{aligned} \tag{B.140}$$

$$\begin{aligned}
Min \quad EI = & \sum_k \sum_{mk} \sum_t EcoInd_k^{product} P_{k,mk,t}^{sold} + \sum_m \sum_h \sum_t EcoInd_m^{raw \text{ material}} M_{m,h,t}^{produced} \\
& + \sum_m \sum_h \sum_{ph} \sum_t EcoIndm_{m,h,ph}^{harvesting \text{ sites-plant}} M_{m,h,ph,t}^{harvesting \text{ sites-plant}} \\
& + \sum_m \sum_h \sum_t EcoIndm_{m,h}^{harvesting \text{ sites-main}} M_{m,h,t}^{harvesting \text{ sites-main}} \\
& \sum_k \sum_{ph} \sum_{mk} \sum_t EcoIndk_{k,ph,mk}^{plant-market} P_{k,ph,mk,t}^{plant-market} + \sum_k \sum_{ph} \sum_t EcoIndk_{k,ph}^{plant-main} P_{k,ph,t}^{plant-main} \\
& \sum_k \sum_{mk} \sum_t EcoIndk_{k,mk}^{main-market} P_{k,mk,t}^{main-market} + \sum_m \sum_k \sum_r \sum_{ph} \sum_t EcoInd_{m,k,r,ph,t}^{processing} M_{m,k,r,ph,t}^{processing} \\
& \sum_m \sum_k \sum_r \sum_t EcoInd_{m,k,r,t}^{processing \text{ main}} M_{m,k,r,t}^{processing \text{ main}}
\end{aligned} \tag{B.141}$$

$$\begin{aligned}
Max \quad SI &= \sum_m \sum_h \sum_t SI_m^{\text{raw material}} M_{m,h,t}^{\text{produced}} \\
&+ \sum_m \sum_h \sum_{ph} \sum_t SI_{m,h,ph}^{\text{harvesting sites-plant}} M_{m,h,ph,t}^{\text{harvesting sites-plant}} \\
&+ \sum_m \sum_h \sum_t SI_{m,h}^{\text{harvesting sites-main}} M_{m,h,t}^{\text{harvesting sites-main}} + \sum_m \sum_{ph} \sum_t SI_{m,ph}^{\text{plant-main}} M_{m,ph,t}^{\text{plant-main}} \\
&+ \sum_k \sum_{ph} \sum_{mk} \sum_t SI_{k,ph,mk}^{\text{plant-market}} P_{k,ph,mk,t}^{\text{plant-market}} + \sum_k \sum_{ph} \sum_t SI_{k,ph}^{\text{plant-main}} P_{k,ph,t}^{\text{plant-main}} \\
&+ \sum_k \sum_{mk} \sum_t SI_{k,mk}^{\text{main-market}} P_{k,mk,t}^{\text{main-market}} + \sum_m \sum_k \sum_r \sum_{ph} \sum_t SI_{m,k,r,ph,t}^{\text{processing}} M_{m,k,r,ph,t}^{\text{processing}} \\
&+ \sum_m \sum_k \sum_r \sum_t SI_{m,k,r,t}^{\text{processing main}} M_{m,k,r,t}^{\text{processing main}}
\end{aligned} \tag{B.142}$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned}
M_{m,h,t}^{\text{harvesting sites}} &= M_{m,h,t-1}^{\text{harvesting sites}} + M_{m,h,t}^{\text{produced}} - \sum_{ph} M_{m,h,ph,t}^{\text{harvesting sites-plant}} \\
&- M_{m,h,t}^{\text{harvesting sites-main}} \quad \forall m \in M, h \in H, t \in T
\end{aligned} \tag{B.143}$$

$$\begin{aligned}
M_{m,ph,t}^{\text{plant}} &= M_{m,ph,t-1}^{\text{plant}} + \sum_h M_{m,h,ph,t}^{\text{harvesting sites-plant}} - \sum_k \sum_r M_{m,k,r,ph,t}^{\text{processing}} - M_{m,ph,t}^{\text{plant-main}} \\
\forall m \in M, ph \in PH, t \in T
\end{aligned} \tag{B.144}$$

$$\begin{aligned}
P_{k,ph,t}^{\text{plant}} &= P_{k,ph,t-1}^{\text{plant}} + \sum_m \sum_r P_{m,k,r,ph,t}^{\text{produced}} - P_{k,ph,t}^{\text{plant-main}} - \sum_{mk} P_{k,ph,mk,t}^{\text{plant-market}} \\
\forall k \in K, ph \in PH, t \in T
\end{aligned} \tag{B.145}$$

$$\begin{aligned}
M_{m,t}^{\text{main}} &= M_{m,t-1}^{\text{main}} + \sum_h M_{m,h,t}^{\text{harvesting sites-main}} + \sum_{ph} M_{m,ph,t}^{\text{plant-main}} \\
&- \sum_k \sum_r M_{m,k,r,t}^{\text{processing main}} \quad \forall m \in M, t \in T
\end{aligned} \tag{B.146}$$

$$\begin{aligned}
P_{k,t}^{\text{main}} &= P_{k,t-1}^{\text{main}} + \sum_m \sum_r P_{m,k,r,t}^{\text{produced-main}} + \sum_{ph} P_{k,ph,t}^{\text{plant-main}} \\
&- \sum_{mk} P_{k,mk,t}^{\text{main-market}} \quad \forall k \in K, t \in T
\end{aligned} \tag{B.147}$$

$$\begin{aligned}
P_{k,mk,t}^{\text{market}} &= P_{k,mk,t-1}^{\text{market}} + \sum_{ph} P_{k,ph,mk,t}^{\text{plant-market}} + P_{k,mk,t}^{\text{main-market}} \\
&- P_{k,mk,t}^{\text{sold}} \quad \forall k \in K, mk \in MK, t \in T
\end{aligned} \tag{B.148}$$

$$P_{k,mk,t}^{\text{sold}} \leq P_{k,mk,t}^{\text{demand}} \quad \forall k \in K, mk \in MK, t \in T \tag{B.149}$$

$$y_{s,l,t}^l Sm_{s,l}^{\text{lower}l} \leq S_{s,l,t}^l \leq y_{s,l,t}^l Sm_{s,l}^{\text{upper}l} \quad \forall s \in S, l \in L, t \in T \tag{B.150}$$

$$\sum_t y_{s,l,t}^l \geq y_{s,l}^{\text{necessary}l} \quad \forall s \in S, l \in L \tag{B.151}$$

$$(\text{Número máximo de períodos}) y_{s,l}^{\text{necessary}l} - \sum_t y_{s,l,t}^l \geq 0 \quad \forall s \in S, l \in L \tag{B.152}$$

$$Sm_{s,l}^l \geq S_{s,l,t}^l \quad \forall s \in S, l \in L, t \in T \tag{B.153}$$

$$Cm_{s,l}^{\text{storage}l} = Csmf_{s,l}^l y_{s,l}^{\text{necessary}l} + Csmv_{s,l}^l Sm_{s,l}^l + \sum_t Csm_s S_{s,l,t}^l \quad \forall s \in S, l \in L \tag{B.154}$$

$$Cm_{s,l}^{\text{storage}l} \leq Cm_{s,l}^{\text{storageMAX}l} y_{s,l}^{\text{necessary}l} \quad \forall s \in S, l \in L \tag{B.155}$$

$$Sm_{s,l}^l \leq Sm_{s,l}^{\text{MAX}l} y_{s,l}^{\text{necessary}l} \quad \forall s \in S, l \in L \tag{B.156}$$

$$S_{s,l,t}^l \leq S_{s,l,t}^{\text{MAX}l} y_{s,l}^{\text{necessary}l} \quad \forall s \in S, l \in L, t \in T \tag{B.157}$$

$$M_{m,h,ph,t}^{\text{harvesting sites-plant}} \leq ym_{m,h,ph,t}^{\text{harvesting sites-plant}} M_{m,h,ph}^{\text{upper harvesting sites-plant}} \quad (B.158)$$

$$\forall m \in M, h \in H, ph \in PH, t \in T$$

$$M_{m,h,t}^{\text{harvesting sites-main}} \leq ym_{m,h,t}^{\text{harvesting sites-main}} M_{m,h}^{\text{upper harvesting sites-main}} \quad (B.159)$$

$$\forall m \in M, h \in H, t \in T$$

$$M_{m,ph,t}^{\text{plant-main}} \leq ym_{m,ph,t}^{\text{plant-main}} M_{m,ph}^{\text{upper plant-main}} \quad \forall m \in M, ph \in PH, t \in T \quad (B.160)$$

$$P_{k,ph,t}^{\text{plant-main}} \leq yp_{k,ph,t}^{\text{plant-main}} P_{k,ph}^{\text{upper plant-main}} \quad \forall k \in K, ph \in PH, t \in T \quad (B.161)$$

$$P_{k,ph,mk,t}^{\text{plant-market}} \leq yp_{k,ph,mk,t}^{\text{plant-market}} P_{k,ph,mk}^{\text{upper plant-market}} \quad \forall k \in K, ph \in PH, mk \in MK, t \in T \quad (B.162)$$

$$P_{k,mk,t}^{\text{main-market}} \leq yp_{k,mk,t}^{\text{main-market}} P_{k,mk}^{\text{upper main-market}} \quad \forall k \in K, mk \in MK, t \in T \quad (B.163)$$

$$M_{m,h,ph,t}^{\text{harvesting sites-plant}} \geq ym_{m,h,ph,t}^{\text{harvesting sites-plant}} M_{m,h,ph}^{\text{lower harvesting sites-plant}} \quad (B.164)$$

$$\forall m \in M, h \in H, ph \in PH, t \in T$$

$$M_{m,h,t}^{\text{harvesting sites-main}} \geq ym_{m,h,t}^{\text{harvesting sites-main}} M_{m,h}^{\text{lower harvesting sites-main}} \quad (B.165)$$

$$\forall m \in M, h \in H, t \in T$$

$$M_{m,ph,t}^{\text{plant-main}} \geq ym_{m,ph,t}^{\text{plant-main}} M_{m,ph}^{\text{lower plant-main}} \quad \forall m \in M, ph \in PH, t \in T \quad (B.166)$$

$$P_{k,ph,t}^{\text{plant-main}} \geq yp_{k,ph,t}^{\text{plant-main}} P_{k,ph}^{\text{lower plant-main}}, \forall k \in K, ph \in PH, t \in T \quad (B.167)$$

$$P_{k,ph,mk,t}^{\text{plant-market}} \geq y p_{k,ph,mk,t}^{\text{plant-market}} P_{k,ph,mk}^{\text{lower-plant-market}} \quad \forall k \in K, ph \in PH, mk \in MK, t \in T \quad (\text{B.168})$$

$$P_{k,mk,t}^{\text{main-market}} \geq y p_{k,mk,t}^{\text{main-market}} P_{k,mk}^{\text{lower-main-market}} \quad \forall k \in K, mk \in MK, t \in T \quad (\text{B.169})$$

$$M_{m,h,ph,t}^{\text{harvesting sites-plant}} = M e_{m,h,ph,t+ttransp}^{\text{harvesting sites-plant}} \quad \forall m \in M, h \in H, ph \in PH, t \in T \quad (\text{B.170})$$

$$M_{m,h,t}^{\text{harvesting sites-main}} = M e_{m,h,t+ttransp}^{\text{harvesting sites-main}} \quad \forall m \in M, h \in H, t \in T \quad (\text{B.171})$$

$$M_{m,ph,t}^{\text{plant-main}} = M e_{m,ph,t+ttransp}^{\text{plant-main}} \quad \forall m \in M, ph \in PH, t \in T \quad (\text{B.172})$$

$$P_{k,ph,t}^{\text{plant-main}} = P e_{k,ph,t+ttransp}^{\text{plant-main}} \quad \forall k \in K, ph \in PH, t \in T \quad (\text{B.173})$$

$$P_{k,ph,mk,t}^{\text{plant-market}} = P e_{k,ph,mk,t+ttransp}^{\text{plant-market}} \quad \forall k \in K, ph \in PH, mk \in MK, t \in T \quad (\text{B.174})$$

$$P_{k,mk,t}^{\text{main-market}} \leq P e_{k,mk,t+ttransp}^{\text{main-market}} \quad \forall k \in K, mk \in MK, t \in T \quad (\text{B.175})$$

$$M_{m,k,r,ph,t}^{\text{processing}} \leq y m_{m,k,r,ph,t}^{\text{processing}} M_{m,k,r,ph,t}^{\text{upper-processing}} \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH, t \in T \quad (\text{B.176})$$

$$M_{m,k,r,ph,t}^{\text{processing}} \geq y m_{m,k,r,ph,t}^{\text{processing}} M_{m,k,r,ph,t}^{\text{lower-processing}} \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH, t \in T \quad (\text{B.177})$$



$$P_{m,k,r,ph,t+tprocessing}^{produced} = \alpha_{m,k,r} M_{m,k,r,ph,t}^{processing} \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH, t \in T \quad (\text{B.178})$$

$$M_{m,k,r,t}^{processing\ main} \leq ym_{m,k,r,t}^{processing\ main} M_{m,k,r}^{upper\ processing\ main} \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, t \in T \quad (\text{B.179})$$

$$M_{m,k,r,t}^{processing\ main} \geq ym_{m,k,r,t}^{processing\ main} M_{m,k,r}^{lower\ processing\ main} \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, t \in T \quad (\text{B.180})$$

$$P_{m,k,r,t+tprocessing}^{produced-main} = \alpha_{m,k,r} M_{m,k,r,t}^{processing\ main} \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, t \in T \quad (\text{B.181})$$

$$y_{pm} m_{m,h,t} M_{m,h,t}^{upper\ produced} \geq M_{m,h,t}^{produced} \quad \forall m \in M, h \in H, r \in R, t \in T \quad (\text{B.182})$$

$$S_{s,l,CARD(t)} = S_{s,l,0} \quad \forall s \in S, l \in L \quad (\text{B.183})$$

A Função Objetivo (B.140) considera o viés econômico em que se deseja maximizar o lucro líquido da cadeia de suprimentos. Portanto, trata-se da diferença entre a receita e os custos de processamento, estoque e transporte ao longo dos diferentes elos da cadeia.

A Função Objetivo (B.141) está voltada para o viés ambiental, em que se adota um peso para cada categoria de impacto do *EcoInvent* a fim de se obter o fator global de impacto ambiental que se deseja minimizar. Assim, consideram-se os impactos ambientais associados à produção de matéria-prima e do produto final (nas plantas primárias e secundárias) e ao transporte. Além disso, assume-se que o impacto varia linearmente de acordo com a quantidade (produzida e/ou transportada).

Já a Função Objetivo (B.142) diz respeito à dimensão social, em que se deseja maximizar o número de empregos criados para execução das diferentes atividades (como produção e transporte) ao longo da cadeia de suprimentos. Os autores destacam a dificuldade em se mensurar esta dimensão, em função da diversidade de tipos de empregos gerados e do impacto destes na sociedade. Apesar das limitações

e pressupostos adotados pelos autores para determinar esta Função Objetivo. é importante reconhecer o esforço de incorporá-la na análise, buscando cadeias de suprimentos mais sustentáveis (ainda que não seja ideal, é um *insight* de como futuros estudos podem incorporar tal dimensão).

As Restrições (B.143) dizem respeito ao balanço de massa das áreas de plantio, indicando que o total de matéria-prima ao final de um período  $t$  (estoque) é equivalente à quantidade restante no período anterior  $t - 1$  mais o que foi produzido no período  $t$ , descontados os envios para as fábricas primárias e secundárias. As Restrições (B.144) e (B.145) se referem ao balanço de massa de matéria-prima e produtos, respectivamente, nas plantas secundárias.

De maneira similar, as Restrições (B.146) e (B.147) estão associadas ao balanço de massa na planta principal, de matéria-prima e produtos, respectivamente. Já as Restrições (B.148) apresentam o balanço de massa da zona consumidora. Percebe-se, portanto, que o modelo permite a formação de estoque (seja de matéria-prima, seja de produto) nos diferentes elos da cadeia de suprimentos. As Restrições (B.149) asseguram que as vendas totais do produto  $k$  no mercado  $mk$  no período  $t$  precisam ser menores ou iguais à demanda. Portanto, assume-se a possibilidade de não atender toda a demanda de um mercado em determinado período.

As Restrições (B.150) a (B.157) dizem respeito a limitações associadas ao estoque. As Restrições (B.150) indicam que, caso haja formação de estoque, este precisa respeitar os limites máximos e mínimos estabelecidos para cada facilidade; enquanto as Restrições (B.151) determinam que, se uma estrutura dedicada ao estoque for instalada em alguma facilidade, ela precisa ser utilizada, pelo menos, uma vez durante determinado período de tempo.

Em contrapartida, as Restrições (B.152) indicam que se o estoque for necessário em, pelo menos, um período  $t$ , a estrutura dedicada ao estoque deverá ser instalada. As Restrições (B.153) dizem respeito à capacidade de armazenamento, enquanto as Restrições (B.154) a (B.157) estão associadas aos custos de armazenagem.

As Restrições (B.158) a (B.169) estão relacionadas ao transporte entre os diferentes elos da cadeia de suprimentos. Percebe-se que a quantidade de materiais transportada entre as diferentes facilidades é limitada pelas restrições de capacidade (mínima e máxima) de produção/processamento destas.

Já as Restrições (B.170) a (B.175) dizem respeito ao tempo de transporte associado a cada tipo de conexão estabelecida na cadeia de suprimentos. Além disso, asseguram que não há processo de transformação durante o transporte (e.g. matéria-prima enviada do campo de colheita não pode chegar a fábrica como produto acabado).

As Restrições (B.176) e (B.177) garantem que a quantidade total de produto  $k$  processado a partir da matéria-prima  $m$  por meio da tecnologia  $r$  na planta se-

cundária  $ph$  no período de tempo  $t$  respeita as capacidades mínimas e máximas da tecnologia adotada. Já as Restrições (B.178) introduz um fator de conversão para garantir a linearidade no processo de transformação da matéria-prima  $m$  em produto  $k$ , por meio da tecnologia  $r$ . As Restrições (B.179) a (B.181) estabelecem o mesmo para a planta principal.

As Restrições B.182 dizem respeito à disponibilidade de matéria-prima  $m$  para produção do produto  $k$ ; enquanto as B.183 asseguram que o modelo possa ser aplicado em qualquer período de tempo, dessa maneira, indicam que o estoque total (de produto ou matéria-prima) no final de determinado período  $t$  será igual ao estoque inicial no período subsequente  $t + 1$ . Ressalta-se que o domínio das variáveis de decisão não foi apresentado de maneira explícita na modelagem do artigo.

Percebe-se que, embora o modelo incorpore decisões de localização-alocação, a aplicação é diferente do que se propõe nesta tese. O foco reside em atender a demanda por meio do processamento de diferentes matérias-primas, através de diversas tecnologias disponíveis em plantas secundárias e principais. Ou seja, as facilidades a serem localizadas não têm como objetivo a integração modal (mas sim, a transformação).

Embora não se aplique ao contexto desta tese, o modelo foi detalhado por ser um dos poucos que aborda a dimensão social na localização de facilidades. Entretanto, a abordagem feita pelos autores talvez não seja a ideal: assume-se que quantidade de empregos gerados varia diretamente com a quantidade produzida (mas isso depende de outros fatores, e.g., tipo de produto, grau de mecanização dos processos, da capacidade da tecnologia em utilização etc.). Não obstante, entende-se que, dada a dificuldade em mensurar a dimensão social, o modelo de Santibañez-Aguilar et al. (2014) é inovador ao apresentar um primeiro ensaio (ainda que limitado) sobre como incorporar os aspectos sociais nas formulações matemáticas.

## B.7 Modelo de Fareeduddin et al. (2015)

Fareeduddin et al. (2015) propõem quatro modelos matemáticos de otimização, sendo três deles baseados em políticas regulatórias de emissão de carbono para determinar o *design* de cadeias de suprimentos fechadas. Com tais modelos busca-se: (i) considerar tanto os aspectos econômicos quanto os ambientais na definição da rede logística; (ii) integrar as decisões relacionadas à localização, tecnologia de produção e alternativas de transporte; e (iii) avaliar os impactos das três políticas de carbono mais comuns (*carbon cap*, *carbon tax* e *carbon cap-and-trade*) nas operações da cadeia de suprimentos.

O estudo de caso considera uma cadeia de suprimentos com três camadas, tanto no fluxo direto (fábricas, centros de distribuição e consumidores finais), quanto no

fluxo reverso (centros de coleta, de reciclagem e de disposição de resíduos). Nos centros de coleta, os produtos no fim da sua vida útil são desmontados, inspecionados e separados em componentes recicláveis (os quais são enviados para os centros de reciclagem) e não-recicláveis (os quais são destinados para os centros de disposição final).

Além disso, a quantidade, capacidade e localização potencial das fábricas, centros de distribuição, centros de coleta e disposição final são conhecidos, bem como as demandas e os mercados consumidores. Já as emissões podem estar associadas aos processos desenvolvidos nas facilidades (e.g. produção/reciclagem), as quais são calculadas em função do tipo de tecnologia usada; ou ao transporte (calculadas de acordo com o modo de transporte empregado nos fluxos diretos e reversos).

Embora seja um artigo de congresso internacional, optou-se por detalhá-lo tendo em vista que é o único dentre os selecionados que estuda três diferentes políticas regulatórias de emissão de carbono. Assim, os modelos propostos por Fareeduddin et al. (2015) estão apresentados da seguinte maneira: (i) Modelo baseado exclusivamente no custo; (ii) Modelo da política *Carbon Cap*; (iii) Modelo de política *Carbon Tax*; e (iv) Modelo da política *cap-and-trade*.

## Conjuntos e índices

$L$	Conjunto de produtos, onde $l \in L$
$T$	Conjunto de tecnologias, onde $t \in T$
$M$	Conjunto de modos de transporte, onde $m \in M$
$C$	Conjunto de clientes ou regiões de consumo (já conhecidos e fixos), onde $c \in C$
$P$	Conjunto de localizações potenciais para as fábricas, onde $p \in P$
$Q$	Conjunto de locais potenciais para os centros de distribuição, onde $q \in Q$
$K$	Conjunto de potenciais localizações para centros de coleta de produtos no fim de vida, onde $k \in K$
$R$	Conjunto de potenciais localizações para centros de reciclagem, onde $r \in R$
$W$	Conjunto de potenciais localizações para centros de disposição final, onde $w \in W$

## Parâmetros

$D_{c,l}$	Demanda do produto $l$ na zona de consumo $c$
$R_{c,l}$	Retorno do produto $l$ da zona de consumo $c$ (no final do ciclo de vida)
$FI_{p,t}$	Custo fixo de abertura e operação da fábrica na localização $p$ com a tecnologia $t$
$FJ_q$	Custo fixo de abertura e operação do centro de distribuição na localização $q$
$FU_k$	Custo fixo de abertura e operação do centro de coleta/inspeção na localização $k$
$FV_r$	Custo fixo de abertura e operação do centro de reciclagem na localização $r$
$FY_w$	Custo fixo de abertura e operação do centro de disposição final na localização $w$
$SI_{p,l,t}$	Capacidade da fábrica $p$ produzir o produto $l$ com a tecnologia $t$
$SJ_{q,l}$	Capacidade do centro de distribuição $q$ em lidar/manter o produto $l$
$SU_{k,l}$	Capacidade do centro de coleta $k$ coletar e inspecionar (triagem inicial) o produto $l$ que retornou após o fim da vida útil

$SV_{r,l}$	Capacidade do centro de reciclagem $r$ reciclar o produto $l$
$SY_{w,l}$	Capacidade do centro de destinação $w$ lidar com o produto descartado $l$
$S_l$	Volume unitário do produto $l$
$CI_{p,l,t}$	Custo unitário de fabricação do produto $l$ na facilidade $p$ com a tecnologia $t$
$CU_{k,l}$	Custo unitário da coleta e inspeção do produto $l$ que retorna ao centro de coleta $k$
$CV_{r,l}$	Custo unitário de reciclagem do produto $l$ no centro de reciclagem $r$
$CY_{w,l}$	Custo unitário de destinação do produto desmontado $l$ ao centro de disposição final $w$
$CIJ_{p,q,l,m}$	Custo unitário de transporte do produto $l$ enviado da fábrica $p$ para o centro de distribuição $q$ pelo modo de transporte $m$
$CJA_{q,c,l,m}$	Custo unitário de transporte do produto $l$ enviado do centro de distribuição $q$ para as zonas de consumo $c$ pelo modo de transporte $m$
$CAU_{c,k,l,m}$	Custo unitário de transporte do produto $l$ retornado da zona de consumo $c$ para o centro de coleta $k$ pelo modo de transporte $m$
$CUV_{k,r,l,m}$	Custo unitário de transporte do produto reciclável $l$ enviado do centro de coleta $k$ para o centro de reciclagem $r$ pelo modo de transporte $m$
$CUI_{r,p,l,m}$	Custo unitário de transporte do produto reciclado $l$ enviado do centro de reciclagem $r$ para a fábrica $p$ pelo modo de transporte $m$
$CUY_{r,w,l,m}$	Custo unitário de transporte do produto descartado $l$ enviado do centro de reciclagem $r$ para o centro de disposição final $w$ pelo modo de transporte $m$
$\alpha_l$	Taxa de retorno do produto usado $l$ , no final de sua vida útil, ou seja, proporção de produtos fabricados que são coletados ao final da sua vida útil.
$\gamma_l$	Taxa de disposição final do produto usado $l$ , ou seja, proporção dos produtos coletados que não vão para a reciclagem.
$EI_{p,t}$	Emissão de carbono, em quilos, na fabricação de uma unidade do produto $l$ na fábrica $p$ com a tecnologia $t$
$EJ_{q,l}$	Emissão de carbono, em quilos, no manuseio de uma unidade do produto $l$ no centro de distribuição $q$
$EV_{r,l}$	Emissão de carbono, em quilos, na reciclagem de uma unidade do produto $l$ no centro de reciclagem $r$
$EU_{k,l}$	Emissão de carbono, em quilos, na fabricação de uma unidade do produto reciclável $l$ no centro de coleta $k$ (entendo como o processo de triagem)
$EIJ_{p,q,l,m}$	Emissão de carbono, em quilos/unidade, no transporte do produto $l$ da fábrica $p$ para o centro de distribuição $q$ usando o modo de transporte $m$
$EJA_{q,c,l,m}$	Emissão de carbono, em quilos/unidade, no transporte do produto $l$ do centro de distribuição $q$ para a zona de demanda $c$ usando o modo de transporte $m$
$EAU_{c,k,l,m}$	Emissão de carbono, em quilos/unidade, no transporte de retorno do produto $l$ da zona de consumo $c$ para o centro de coleta $k$ usando o modo de transporte $m$
$EUV_{k,r,l,m}$	Emissão de carbono, em quilos/unidade, no transporte do produto reciclável $l$ do centro de coleta $k$ para o centro de reciclagem $r$ usando o modo de transporte $m$
$EUY_{k,w,l,m}$	Emissão de carbono, em quilos/unidade, no transporte do produto descartado (não-reciclável) $l$ do centro de coleta $k$ para o centro de disposição final $w$ usando o modo de transporte $m$
$EVI_{r,p,l,m}$	Emissão de carbono, em quilos/unidade, no transporte do produto reciclado $l$ do centro de reciclagem $r$ para a fábrica $p$ usando o modo de transporte $m$
$C^{cap}$	Limite de carbono fixado ( <i>carbon cap</i> ) para emissão durante todo o horizonte de planejamento, em quilos

$\delta$	Carbon tax rate por unidade (kg), ou seja, quantidade de imposto paga por unidade emitida
$p^+$	Preço de venda do carbono, por unidade (kg), no mercado de carbono
$p^-$	Preço de compra do carbono, por unidade (kg), no mercado de carbono

## Variáveis de decisão

$ZI_{p,t}$	Variável binária que indica se a fábrica $p$ está aberta com a tecnologia $t$ ( $ZI_{p,t} = 1$ ) ou não ( $ZI_{p,t} = 0$ )
$ZJ_q$	Variável binária que indica se o centro de distribuição $q$ está aberto ( $ZJ_q = 1$ ) ou não ( $ZJ_q = 0$ )
$ZU_k$	Variável binária que indica se o centro de coleta $k$ está aberto ( $ZU_k = 1$ ) ou não ( $ZU_k = 0$ )
$ZV_r$	Variável binária que indica se o centro de reciclagem $r$ está aberto ( $ZV_r = 1$ ) ou não ( $ZV_r = 0$ )
$ZY_w$	Variável binária que indica se o centro de de disposição final $w$ está aberto ( $ZY_w = 1$ ) ou não ( $ZY_w = 0$ )
$QI_{p,l,t}$	Quantidade de produto $l$ produzido na fábrica $p$ usando a tecnologia $t$
$QIJ_{p,q,l,m}$	Quantidade de produto $l$ transportado da fábrica $p$ para o centro de distribuição $q$ usando o modo de transporte $m$
$QJA_{q,c,l,m}$	Quantidade de produto $l$ transportado do centro de distribuição $q$ para a zona de consumo $c$ usando o modo de transporte $m$
$QAU_{c,k,l,m}$	Quantidade de produto de retorno $l$ transportado da zona de consumo $c$ para o centro de coleta $k$ usando o modo de transporte $m$
$QUV_{k,r,l,m}$	Quantidade de produto reciclável $l$ transportado do centro de coleta $k$ para o centro de reciclagem $r$ usando o modo de transporte $m$
$QIV_{r,q,l,m}$	Quantidade de produto reciclado $l$ transportado do centro de reciclagem $r$ para a fábrica $p$ usando o modo de transporte $m$
$QUY_{k,w,l,m}$	Quantidade de produto para descarte $l$ transportado do centro de coleta $k$ para o centro de disposição final $w$ usando o modo de transporte $m$
$e^+$	Quantidade de crédito de carbono comprada
$e^-$	Quantidade de crédito de carbono vendida

## Modelagens matemáticas

### A - Modelo baseado exclusivamente no custo

Este modelo assume que os desembolsos esperados na cadeia de suprimentos são compostos pelos seguintes custos: (i) fixos - Eq. (B.184); (ii) de produção - Eq. (B.185); (iii) de coleta e inspeção - Eq. (B.186); (iv) de reciclagem - Eq. (B.187); (v) de disposição final- Eq. (B.188); e (vi) de transporte - Eq. (B.189).

$$Z_{11} = \sum_{p,t} FI_{p,t} ZI_{p,t} + \sum_q FJ_q ZJ_q + \sum_k FU_k ZU_k + \sum_r FV_r ZV_r + \sum_w FY_w ZY_w \quad (\text{B.184})$$

$$Z_{12} = \sum_{p,l,t} CI_{p,l,t} QI_{p,l,t} \quad (\text{B.185})$$

$$Z_{13} = \sum_{c,k,l,m} CU_{k,l} QAU_{c,k,l,m} \quad (\text{B.186})$$

$$Z_{14} = \sum_{r,p,l,m} CV_{r,l} QVI_{r,p,l,m} \quad (\text{B.187})$$

$$Z_{15} = \sum_{k,w,l,m} CY_{w,l} QUY_{k,w,l,m} \quad (\text{B.188})$$

$$\begin{aligned} Z_{16} = & \sum_{p,q,l,m} CIJ_{p,q,l,m} QIJ_{p,q,l,m} + \sum_{q,c,l,m} CJA_{q,c,l,m} QJA_{q,c,l,m} + \sum_{c,k,l,m} CAU_{c,k,l,m} QAU_{c,k,l,m} \\ & + \sum_{k,r,l,m} CUV_{k,r,l,m} QUV_{k,r,l,m} + \sum_{r,p,l,m} CVI_{r,p,l,m} QVI_{r,p,l,m} + \sum_{k,w,l,m} CUY_{k,w,l,m} QUY_{k,w,l,m} \end{aligned} \quad (\text{B.189})$$

Portanto, o modelo matemático baseado exclusivamente no custo está descrito a seguir.

$$\text{Min } Z_1 = Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{14} + Z_{15} + Z_{16} \quad (\text{B.190})$$

Sujeito a:

$$\sum_t QI_{p,l,t} = \sum_{q,m} QIJ_{p,q,l,m} \quad \forall p \in P, l \in L \quad (\text{B.191})$$

$$\sum_{p,m} QIJ_{p,q,l,m} = \sum_{c,m} QJA_{q,c,l,m} \quad \forall q \in Q, l \in L \quad (\text{B.192})$$

$$\sum_{q,m} QJA_{q,c,l,m} = D_{c,l} \quad \forall c \in C, l \in L \quad (\text{B.193})$$

$$\sum_{k,m} QAU_{c,k,l,m} = D_{c,l} \alpha_l \quad \forall c \in C, l \in L \quad (\text{B.194})$$

$$\sum_{w,m} QUY_{k,w,l,m} = \sum_{c,m} \gamma_l QAU_{c,k,l,m} \quad \forall k \in K, l \in L \quad (\text{B.195})$$

$$\sum_{c,m} QAU_{c,k,l,m} = \sum_{w,m} QUY_{k,w,l,m} + \sum_{r,m} QUV_{k,r,l,m} \quad \forall k \in K, l \in L \quad (\text{B.196})$$

$$\sum_{p,m} QVI_{r,p,l,m} = \sum_{k,m} QUV_{k,r,l,m} \quad \forall r \in R, l \in L \quad (\text{B.197})$$

$$\sum_{q,m} QVI_{r,p,l,m} \leq \sum_t QI_{p,l,t} \quad \forall p \in P, l \in L \quad (\text{B.198})$$

$$\sum_l S_l QI_{p,l,t} \leq SI_{p,t} ZI_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (\text{B.199})$$

$$\sum_{p,l,m} S_l QIJ_{p,q,l,m} \leq SJ_q ZJ_q \quad \forall q \in Q \quad (\text{B.200})$$

$$\sum_{c,l,m} S_l QAU_{c,k,l,m} \leq SU_k ZU_k \quad \forall k \in K \quad (\text{B.201})$$

$$\sum_{k,l,m} S_l QUV_{k,r,l,m} \leq SV_r ZV_r \quad \forall r \in R \quad (\text{B.202})$$

$$\sum_{k,l,m} S_l QUY_{k,w,l,m} \leq SY_w ZY_w \quad \forall w \in W \quad (\text{B.203})$$

$$\sum_t ZI_{p,t} \leq 1 \quad \forall p \in P \quad (\text{B.204})$$

$$QIJ_{p,q,l,m}, QJA_{q,c,l,m}, QAU_{c,k,l,m}, QUV_{k,r,l,m}, QUY_{k,w,l,m}, QVI_{r,p,l,m} \geq 0 \quad (\text{B.205})$$

$$ZI_{p,t}, ZU_k, ZV_r, ZY_w \in \{0, 1\} \quad (\text{B.206})$$

A Função Objetivo (B.190) indica que o menor custo total da rede logística, envolvendo os custos fixos de abertura de facilidades, além dos custos de produção, de coleta e inspeção, de reciclagem, de disposição final e de transporte, deve ser minimizado. As Restrições (B.191) asseguram que a soma dos fluxos de cada fábrica não pode exceder a produção total, enquanto as Restrições (B.192) definem que a soma dos fluxos de saída de cada centro de distribuição não pode ser maior que o fluxo de entrada em cada um desses centros.

As Restrições (B.193), por sua vez, indicam que a demanda das zonas consumidoras precisam ser atendidas pelos centros de distribuição existentes. Já as Restrições (B.194) representam a relação entre a demanda e a taxa de retorno dos produtos após o fim da sua vida útil para os centros de coleta; enquanto as Restrições (B.195)



discorrem sobre a relação entre a quantidade de produtos que retornam ao centro de coleta e a quantidade que será desmontada e encaminhada para descarte (não reciclável).

As Restrições (B.196) dizem respeito ao balanço de massa no centro de coleta, indicando que a quantidade de entrada deve ser igual a de saída (não formando, portanto, estoque). De maneira similar, as Restrições (B.197) apresentam o balanço de massa do centro de reciclagem, enquanto as Restrições (B.198) indicam que a quantidade reciclada não pode ser superior àquela produzida.

As Restrições (B.199) determinam que a quantidade produzida em cada horizonte de planejamento em cada fábrica não pode exceder sua capacidade de produção. De maneira semelhante, as Restrições (B.200) asseguram que o fluxo de entrada em cada centro de distribuição não pode exceder sua capacidade e as Restrições (B.201) indicam que o fluxo de produtos de retorno não pode ser maior que a capacidade do centro de coleta.

As Restrições (B.202), por sua vez, determinam que o fluxo de produtos recicláveis não pode exceder a capacidade do centro de reciclagem, enquanto as (B.203) indicam que o montante de produtos não-recicláveis que saem dos centros de coleta não pode exceder a capacidade dos centros de disposição final. As Restrições (B.204) asseguram que em cada localização potencial das fábricas deve ser estabelecido, pelo menos, um tipo de tecnologia. Por fim, as Restrições (B.205) e (B.206) dizem respeito ao domínio das variáveis de decisão.

### Modelo da política *Carbon Cap*

Neste modelo, permite-se que determinada empresa emita uma quantidade fixa de carbono, chamada de política *carbon cap*. A formulação matemática é apresentada a seguir:

$$\text{Min } Z_2 = Z_1 \quad (\text{B.207})$$

Sujeito a:

Restrições (B.191)-(B.206)

$$\begin{aligned} & \sum_{p,l,t} EI_{p,l,t} ZI_{p,t} + \sum_{q,l} EJ_{q,l} ZJ_q + \sum_{k,l} EU_{k,l} ZU_k + \sum_{r,l} EV_{r,l} ZV_r + \\ & \sum_{p,q,l,m} EI_{p,q,l,m} QI_{p,q,l,m} + \sum_{q,c,l,m} EJA_{q,c,l,m} QJA_{q,c,l,m} + \\ & \sum_{c,k,l,m} EAU_{c,k,l,m} QAU_{c,k,l,m} + \sum_{k,r,l,m} EUV_{k,r,l,m} QUV_{k,r,l,m} + \\ & \sum_{r,p,l,m} EVI_{r,p,l,m} QVI_{r,p,l,m} + \sum_{k,w,l,m} EUY_{k,w,l,m} QUY_{k,w,l,m} \leq C^{cap} \end{aligned} \quad (\text{B.208})$$

Percebe-se, portanto, que este modelo difere do anterior apenas pela incorporação das Restrições (B.208), a qual determina que as emissões decorrentes das atividades logísticas (produção e transporte) na cadeia de suprimentos não podem exceder o limite de emissão de carbono estabelecido (*carbon cap*).

### Modelo de política *Carbon Tax*

Neste modelo, em vez de determinar limites fixos de emissão de carbono, impõem-se multas como penalização sobre as emissões (i.e. estabelecem-se penalidades financeiras por unidade de CO<sub>2</sub> emitida nas operações da cadeia de suprimentos). Assim, tem-se o modelo:

$$\text{Min } Z_3 = Z_1 + \delta(Z_{31} + Z_{32}) \quad (\text{B.209})$$

Sujeito a:

Restrições(B.191)-(B.206).

Com  $Z_{31}$  e  $Z_{32}$  definidas pelas Equações (B.210) e (B.211).

$$Z_{31} = \sum_{p,l,t} EI_{p,l,t} ZI_{p,t} + \sum_{q,l} EJ_{q,l} ZJ_q + \sum_{k,l} EU_{k,l} ZU_k + \sum_{r,l} EV_{r,l} ZV_r \quad (\text{B.210})$$

$$\begin{aligned} Z_{32} = & \sum_{p,q,l,m} EIJ_{p,q,l,m} QIJ_{p,q,l,m} + \sum_{q,c,l,m} EJA_{q,c,l,m} QJA_{q,c,l,m} + \\ & \sum_{c,k,l,m} EAU_{c,k,l,m} QAU_{c,k,l,m} + \sum_{k,r,l,m} EUV_{k,r,l,m} QUV_{k,r,l,m} + \\ & \sum_{r,p,l,m} EVI_{r,p,l,m} QVI_{r,p,l,m} + \sum_{k,w,l,m} EUY_{k,w,l,m} QUY_{k,w,l,m} \end{aligned} \quad (\text{B.211})$$

Verifica-se que apenas a Função Objetivo (B.209) é modificada em relação ao primeiro modelo (que considera exclusivamente o custo), incorporando os custos associados às penalizações decorrentes das emissões de carbono nas facilidades ( $Z_{31}$ ) e no transporte ( $Z_{32}$ ). Neste caso, não há uma limitação sobre a quantidade emitida, mas toda unidade emitida é taxada.

### Modelo da política *Cap-and-trade*

Neste modelo assume-se a existência do comércio de carbono, ou seja, as empresas podem comercializar sua “permissão” para emití-lo. Dessa forma, determinada

empresa pode tanto vender (caso emita menos que o limite a ela concedido), quanto comprar autorizações de terceiros. Esse modelo é apresentado a seguir:

$$\text{Min } Z_4 = Z_1 - p^+ e^+ + p^- e^- \quad (\text{B.212})$$

Sujeito a:

Restrições (B.191)-(B.206)

$$\begin{aligned} & \sum_{p,l,t} EI_{p,l,t} ZI_{p,t} + \sum_{q,l} EJ_{q,l} ZJ_q + \sum_{k,l} EU_{k,l} ZU_k + \sum_{r,l} EV_{r,l} ZV_r + \\ & \sum_{p,q,l,m} EIJ_{p,q,l,m} QIJ_{p,q,l,m} + \sum_{q,c,l,m} EJA_{q,c,l,m} QJA_{q,c,l,m} + \\ & \sum_{c,k,l,m} EAU_{c,k,l,m} QAU_{c,k,l,m} + \sum_{k,r,l,m} EUV_{k,r,l,m} QUV_{k,r,l,m} + \\ & \sum_{r,p,l,m} EVI_{r,p,l,m} QVI_{r,p,l,m} + \sum_{k,w,l,m} EUY_{k,w,l,m} QUY_{k,w,l,m} + e^- \leq C^{cap} + e^+ \end{aligned} \quad (\text{B.213})$$

$$e^+, e^- \geq 0; \quad (\text{B.214})$$

Percebe-se que este modelo é uma adaptação do *Carbon cap*, em que a Função Objetivo (B.212) considera a possibilidade de comércio de carbono (custos associados a compra ou receitas decorrentes da venda de “autorizações” de emissão de carbono). Além disso, nas Restrições (B.208) adiciona-se a quantidade de crédito de carbono comprada ao limite anteriormente fixado (conforme apresentado nas Restrições (B.213)). Por fim, tem-se a Restrição (B.214) de domínio das variáveis  $e^+$  e  $e^-$ .

Uma vez apresentados os modelos investigados por Fareeduddin et al. (2015), enfatiza-se que a proposta dos autores tem como enfoque a análise de cadeias de suprimentos fechadas, em que se contabilizam as emissões de carbono de seus diferentes elos (diretos e reversos). Entretanto, ainda que se tenha um enfoque mais amplo, este trabalho foi útil na proposição da modelagem matemática desta tese, por apresentar diferentes maneiras de lidar com a política de regulação da emissão de carbono. Não obstante, os autores fazem a validação do modelo com dados fictícios, portanto, não detalham como seriam mensurados os parâmetros de emissão em casos reais.

# Apêndice C

## Grupos de produtos estabelecidos no PNLT

Este apêndice tem como objetivo apresentar, por meio da Tabela C.1 - adaptada de Guimarães (2015), as características de cada grupo de produtos estabelecido no PNLT. Os critérios adotados para este agrupamento foram descritos na Seção 5.2 do Capítulo 5. Destaca-se que a primeira coluna da tabela se refere aos grupos indicados no PNLT, sendo G1 = grupo 1; G2 = grupo 2; G3 = grupo 3; G4 = grupo 4; e, G5 = grupo 5.

Tabela C.1: Grupos de produtos definidos pelo PNLT

(1)	Descrição	Características e particularidades	Produtos
G1	Os produtos foram agrupados de acordo com seu valor bruto de produção - com base em estudos econômicos - e pela possibilidade de desenvolvimento de matriz O/D - de acordo com estudos do transporte regional de carga. Engloba, portanto, o caso dos complexos soja e milho, produtos siderúrgicos, combustíveis e outros.	<p>(i) Produtos com geração de grandes volumes de transporte;</p> <p>Produção e/ou consumo estabelecidos de forma concentrada em determinadas regiões;</p> <p>(ii) Elevado grau de homogeneidade em grande parte das regiões de produção;</p> <p>(iii) Características físicas que permitem o uso do transporte multimodal;</p> <p>(iv) Produtos com informações disponíveis para realizar análises e estimativas de O/D; e</p> <p>(iv) Uso de equipamentos de transportes que permitam ocupação total da sua capacidade. Assim, o número de viagens pode ser calculado pela razão entre a quantidade produzida e a capacidade dos veículos.</p>	<p>Alcool; Automóveis, camionetas e utilitários; Cana-de-açúcar; Carvão mineral; Celulose e outras pastas para fabricação de papel; Cimento; Gasolina automotiva; Gaseolcool; Milho em grão; Minério de ferro; Metais metálicos não-ferrosos; Óleo de soja em bruto e tortas, bagaços e farelo de soja; Óleo combustível e óleo diesel; Produtos da exploração florestal e da silvicultura; Petróleo e gás natural; Produtos das usinas e do refino de açúcar; Semicabados, laminados planos, longos e tubos de aço; Soja em grão</p>
G2	Os produtos selecionados seguem o critério de valor bruto de produção, de acordo com estudos econômicos. Porém, não é necessário exatidão para desenvolvimento de matriz O/D - seguindo os estudos de transporte regional de carga. Nesse grupo, é permitida carência de bases de dados relativas ao comportamento nos seus diferentes locais de consumo.	<p>(i) Menores volumes de transporte;</p> <p>(ii) Devem possuir informações suficientes para, minimamente, quantificar os volumes de produção;</p> <p>(iii) Menor possibilidade de uso do transporte multimodal; e</p> <p>(iv) Uso de equipamentos de transportes que permitam ocupação total da sua capacidade. Assim, o número de viagens pode ser calculado pela razão entre a quantidade produzida e a capacidade dos veículos.</p>	<p>Abate e preparação de produtos de carne; Algodão herbáceo; Arroz em casca; Arroz beneficiado e derivados; Aves vivas; Bovinos e outros animais vivos; Café em grão; Caminhões e ônibus; Carne de suíno e de aves - fresca, refrigerada ou congelada; Café torrado, moído e solúvel; Fabricação de resina e elastômeros; Farinha de trigo e derivados; Farinha de mandioca e outros; Frutas cítricas; Fumo em folha; Gás liquefeito de petróleo; Gusa e ferro-ligas; Leite de vaca e de outros animais; Mandioca; Metais não-metálicos; Óleos de milho, amidos e féculas vegetais e rações; Óleo de soja refinado; Outros produtos e serviços da lavoura; Outros produtos do refino de petróleo e coque; Ovos de aves; Papel e papelão, embalagens e artefatos; Pesca e aquicultura; Produtos do fumo; Produtos químicos orgânicos/inorgânicos; Suínos vivos; Trigo em grão e outros cereais</p>

Tabela C.1 Grupos de produtos definidos pelo PNLIT (continuação)

(1) Descrição	Características e particularidades	Produtos
<p>G3 Os produtos são agrupados de acordo com seu valor bruto de produção nos estudos econômicos. Além disso, devem agregar outras mercadorias. Assim, uma análise individual dos componentes de cada produto foi realizada para verificar se o valor e/ou volume é dominante em relação aos outros, evitando, então, distorções nos resultados da matriz de transportes gerada.</p>	<p>(i) Para mercadorias com volume considerado significativo, considerou-se a reclassificação para os Grupos 1 e 2 de acordo com a desagregação de informações dos estudos econômicos; e</p> <p>(ii) As mercadorias restantes são reclassificadas para o Grupo 4.</p>	<p>Minerais metálicos não-ferrosos; Metais não-metálicos; Outros produtos e serviços da lavoura; Outros produtos do refino de petróleo e coque; Produtos da exploração florestal e da silvicultura; Produtos químicos inorgânicos; Sucatas reciclada</p>
<p>G4 Produtos relacionados pelo critério de valor bruto de produção, grande dispersão de produção e/ou consumo que não permitem análises setoriais. Podem ser divididos em 2 subgrupos: alto valor agregado e médio valor agregado.</p>	<p>(i) Normalmente são produtos classificados como carga geral;</p> <p>(ii) Sua heterogeneidade não possibilita execução de análises setoriais pela escassez de informações disponíveis;</p> <p>(iii) Características físicas (forma e dimensão) não permitem valorar frete em reais/tonelada; e</p> <p>(iv) Na distribuição, os veículos utilizados são comparados com outros produtos.</p>	<p>Aparelhos/instrumentos médico-hospitalar, medida e óptico; Artigos de borracha; Artigos de plástico; Bebidas; Beneficiamento de algodão e de outros têxteis e fição; Conservas de frutas, legumes e outros vegetais; Defensivos agrícolas; Eletrodomésticos; Fundidos de aço; Jornais, revistas, discos e outros produtos gravados; Leite resfriado, esterilizado e pasteurizado; Máquinas, aparelhos e materiais elétricos; Máquinas e equipamentos, inclusive manutenção e reparos; Outros óleos e gordura vegetal e animal exclusive milho; Outros produtos alimentares; Outros equipamentos de transporte; Peças e acessórios para veículos automotores; Perfumaria, sabões e artigos de limpeza; Pescado industrializado; Produtos do laticínio e sorvetes; Produtos de madeira - exclusive móveis; Produtos de metal - exclusive máquinas e equipamentos; Produtos da metalurgia de metais não-ferrosos e outros produtos de metais não-metálicos; Produtos e preparados químicos diversos; Tecelagem e fabricação outros produtos têxteis; Tintas, vernizes, esmaltes e lacas</p>
<p>G5 Aqui os "produtos" estão relacionados de acordo com seu valor. No entanto, são aqueles que não demandam transportes diretos (prestações de serviço, em geral).</p>	<p>(i) Atividades que tem o objetivo de apoio a segmentos ou atendimento a setores e indivíduos; e</p> <p>(ii) Atuam em diferentes campos em função da produção, execução ou complementação de algo.</p>	<p>Aluguel imputado; Comércio; Construção; Correio; Educação mercantil; Educação pública; Eletricidade e gás, água, esgoto e limpeza urbana; Intermediação financeira e seguros; Móveis e produtos das indústrias diversas; Saúde mercantil; Saúde pública; Serviços associativos; Serviços de alojamento e alimentação; Serviços de informação; Serviços de manutenção e reparação; Serviços domésticos; Serviços imobiliários e aluguel; Serviços prestados às famílias; Serviços prestados às empresas; Serviço público e seguridade social; Transporte de carga e de passageiro.</p>

# Apêndice D

## Matriz O/D dos quatro produtos selecionados consolidada por região do IBGE

Este apêndice tem como objetivo apresentar as matrizes O/D dos quatro produtos selecionados para validação do modelo proposto nesta tese. As Tabelas D.1, D.2, D.3 e D.4 apresentam, respectivamente, os volumes de produção e demanda de soja, farelo de soja, milho e açúcar em cada uma das regiões do IBGE.

Tabela D.1: Matriz O/D da soja, consolidada por região (em toneladas)

O/D	Norte	Nordeste	Centro-oeste	Sudeste	Sul	Exterior	Total
Norte	402.690	73.300	17.700	0	0	4.023.840	4.517.530
Nordeste	44.890	4.764.720	93.650	184.970	0	9.541.230	14.629.460
Centro-oeste	656.260	0	18.140.230	2.615.360	2.602.570	15.086.380	39.100.800
Sudeste	0	0	134.670	1.333.990	164.920	1.886.410	3.519.990
Sul	0	0	0	213.780	14.607.710	9.292.340	24.113.830
Total	1.103.840	4.838.020	18.386.250	4.348.100	17.375.200	39.830.200	85.881.610

Tabela D.2: Matriz O/D do farelo de soja, consolidada por região (em toneladas)

O/D	Norte	Nordeste	Centro-oeste	Sudeste	Sul	Exterior	Total
Norte	27.470	0	0	0	0	143.450	170.920
Nordeste	16.230	196.980	6.730	36.810	0	122.170	378.920
Centro-oeste	51.920	149.520	264.240	593.100	21.680	568.610	1.649.070
Sudeste	0	0	65.230	350.450	20.610	167.970	604.260
Sul	0	0	0	186.560	400.960	2.314.810	2.902.330
Total	95.620	346.500	336.200	1.166.920	443.250	3.317.010	5.705.500

Tabela D.3: Matriz O/D do milho, consolidada por região (em toneladas)

O/D	Norte	Nordeste	CentroOeste	Sudeste	Sul	Exterior	Total
Norte	629.200	129.020	0	17.830	0	2.326.010	3.102.060
Nordeste	19.380	2.379.650	0	646.790	0	5.614.160	8.659.980
Centro-oeste	400.420	429.300	5.968.450	3.026.970	6.253.710	3.877.850	19.956.700
Sudeste	0	24.320	0	5.645.760	297.940	2.898.340	8.866.360
Sul	0	0	4.560	437.960	18.387.720	3.236.800	22.067.040
Total	1.049.000	2.962.290	5.973.010	9.775.310	24.939.370	17.953.160	62.652.140

Tabela D.4: Matriz O/D do açúcar, consolidada por região (em toneladas)

O/D	Norte	Nordeste	Centro-oeste	Sudeste	Sul	Exterior	Total
Norte	25.950	0	0	0	0	30.430	56380
Nordeste	48.830	1.419.500	1.430	3.340	0	9.532.160	11.005.260
Centro-oeste	367.110	0	677.070	359.210	87.250	2.987.370	4.478.010
Sudeste	361.850	1.322.600	354.350	4.887.900	948.590	26.762.850	34.638.140
Sul	0	0	1.330	231.940	440.530	3.458.150	4.131.950
Total	803.740	2.742.100	1.034.180	5.482.390	1.476.370	42.770.960	54.309.740



# Apêndice E

## Microrregiões candidatas à localização de CILs

Este apêndice tem como objetivo apresentar a lista com as informações dos candidatos a CILs que complementam a Figura 5.7 apresentados na Seção 5.4 do Capítulo 5. São descritos o código, o estado e a região do IBGE associados a cada microrregião candidata.

Tabela E.1: Apresentação das microrregiões candidatas à localização de CILs

Código	Microrregião	UF	Região IBGE
11001	PORTO VELHO	RO	Norte
11007	VILHENA	RO	Norte
12001	CRUZEIRO DO SUL	AC	Norte
12004	RIO BRANCO	AC	Norte
13007	MANAUS	AM	Norte
13009	ITACOATIARA	AM	Norte
14002	NORDESTE DE RORAIMA	RR	Norte
15002	SANTAREM	PA	Norte
15012	TOME-ACU	PA	Norte
15014	ITAITUBA	PA	Norte
15019	PARAUPEBAS	PA	Norte
15020	MARABA	PA	Norte
17002	ARAGUAINA	TO	Norte
17004	RIO FORMOSO	TO	Norte
17005	GURUPI	TO	Norte
17006	PORTO NACIONAL	TO	Norte
17008	DIANOPOLIS	TO	Norte
21003	ROSARIO	MA	Nordeste
21006	ITAPECURU MIRIM	MA	Nordeste
21009	IMPERATRIZ	MA	Nordeste
21020	GERAIS DE BALSAS	MA	Nordeste
22002	LITORAL PIAUIENSE	PI	Nordeste
22007	ALTO PARNAIBA PIAUIENSE	PI	Nordeste
23005	SOBRAL	CE	Nordeste
23006	IPU	CE	Nordeste
23009	BAIXO CURU	CE	Nordeste
26001	ARARIPINA	PE	Nordeste
26004	SERTAO DO MOXOTO	PE	Nordeste
26005	PETROLINA	PE	Nordeste

Tabela E.1: Apresentação das microrregiões candidatas à localização de CILs

Código	Microrregião	UF	Região IBGE
26008	VALE DO IPOJUCA	PE	Nordeste
26013	MATA SETENTRIONAL PERNAMBUCANA	PE	Nordeste
26015	MATA MERIDIONAL PERNAMBUCANA	PE	Nordeste
27006	ARAPIRACA	AL	Nordeste
27008	SERRANA DOS QUILOMBOS	AL	Nordeste
28010	BAIXO COTINGUIBA	SE	Nordeste
28012	BOQUIM	SE	Nordeste
29001	BARREIRAS	BA	Nordeste
29002	COTEGIPE	BA	Nordeste
29003	SANTA MARIA DA VITORIA	BA	Nordeste
29004	JUAZEIRO	BA	Nordeste
29007	BOM JESUS DA LAPA	BA	Nordeste
29008	SENHOR DO BONFIM	BA	Nordeste
29011	ITABERABA	BA	Nordeste
29012	FEIRA DE SANTANA	BA	Nordeste
29014	EUCLIDES DA CUNHA	BA	Nordeste
29016	SERRINHA	BA	Nordeste
29017	ALAGOINHAS	BA	Nordeste
29020	SANTO ANTONIO DE JESUS	BA	Nordeste
29023	SEABRA	BA	Nordeste
29026	GUANAMBI	BA	Nordeste
29027	BRUMADO	BA	Nordeste
29028	VITORIA DA CONQUISTA	BA	Nordeste
29032	PORTO SEGURO	BA	Nordeste
31001	UNAI	MG	Sudeste
31002	PARACATU	MG	Sudeste
31004	JANAUBA	MG	Sudeste
31007	MONTES CLAROS	MG	Sudeste
31017	ITUIUTABA	MG	Sudeste
31018	UBERLANDIA	MG	Sudeste
31019	PATROCINIO	MG	Sudeste
31020	PATOS DE MINAS	MG	Sudeste
31021	FRUTAL	MG	Sudeste
31022	UBERABA	MG	Sudeste
31023	ARAXA	MG	Sudeste
31047	PASSOS	MG	Sudeste
31050	VARGINHA	MG	Sudeste
31051	POCOS DE CALDAS	MG	Sudeste
31059	BARBACENA	MG	Sudeste
32005	SAO MATEUS	ES	Sudeste
32006	LINHARES	ES	Sudeste
32007	AFONSO CLAUDIO	ES	Sudeste
33002	SANTO ANTONIO DE PADUA	RJ	Sudeste
33003	CAMPOS DOS GOYTACAZES	RJ	Sudeste
35001	JALES	SP	Sudeste
35002	FERNANDOPOLIS	SP	Sudeste
35003	VOTUPORANGA	SP	Sudeste
35004	SAO JOSE DO RIO PRETO	SP	Sudeste
35005	CATANDUVA	SP	Sudeste
35009	BARRETOS	SP	Sudeste
35010	SAO JOAQUIM DA BARRA	SP	Sudeste
35011	ITUVERAVA	SP	Sudeste
35013	JABOTICABAL	SP	Sudeste
35014	RIBEIRAO PRETO	SP	Sudeste

Tabela E.1: Apresentação das microrregiões candidatas à localização de CILs

Código	Microrregião	UF	Região IBGE
35015	BATATAIS	SP	Sudeste
35016	ANDRADINA	SP	Sudeste
35017	ARACATUBA	SP	Sudeste
35018	BIRIGUI	SP	Sudeste
35019	LINS	SP	Sudeste
35020	BAURU	SP	Sudeste
35021	JAU	SP	Sudeste
35022	AVARE	SP	Sudeste
35023	BOTUCATU	SP	Sudeste
35024	ARARAQUARA	SP	Sudeste
35025	SAO CARLOS	SP	Sudeste
35026	RIO CLARO	SP	Sudeste
35027	LIMEIRA	SP	Sudeste
35028	PIRACICABA	SP	Sudeste
35029	PIRASSUNUNGA	SP	Sudeste
35030	SAO JOAO DA BOA VISTA	SP	Sudeste
35031	MOJI-MIRIM	SP	Sudeste
35032	CAMPINAS	SP	Sudeste
35035	ADAMANTINA	SP	Sudeste
35036	PRESIDENTE PRUDENTE	SP	Sudeste
35037	TUPA	SP	Sudeste
35038	MARILIA	SP	Sudeste
35039	ASSIS	SP	Sudeste
35040	OURINHOS	SP	Sudeste
35041	ITAPEVA	SP	Sudeste
35042	ITAPETININGA	SP	Sudeste
35044	CAPAO BONITO	SP	Sudeste
35050	SAO JOSE DOS CAMPOS	SP	Sudeste
41003	CIANORTE	PR	Sul
41005	CAMPO MOURAO	PR	Sul
41009	MARINGA	PR	Sul
41010	APUCARANA	PR	Sul
41011	LONDRINA	PR	Sul
41015	CORNELIO PROCOPIO	PR	Sul
41019	TELEMACO BORBA	PR	Sul
41020	JAGUARIAIVA	PR	Sul
41021	PONTA GROSSA	PR	Sul
41022	TOLEDO	PR	Sul
41023	CASCADEL	PR	Sul
41024	FOZ DO IGUACU	PR	Sul
41027	PATO BRANCO	PR	Sul
41029	GUARAPUAVA	PR	Sul
41032	IRATI	PR	Sul
41033	UNIAO DA VITORIA	PR	Sul
41036	LAPA	PR	Sul
41037	CURITIBA	PR	Sul
42001	SAO MIGUEL D'OESTE	SC	Sul
42002	CHAPECO	SC	Sul
42003	XANXERE	SC	Sul
42004	JOACABA	SC	Sul
42006	CANOINHAS	SC	Sul
42009	CURITIBANOS	SC	Sul
42010	CAMPOS DE LAGES	SC	Sul
42012	BLUMENAU	SC	Sul

Tabela E.1: Apresentação das microrregiões candidatas à localização de CILs

Código	Microrregião	UF	Região IBGE
42019	CRICIUMA	SC	Sul
43001	SANTA ROSA	RS	Sul
43004	ERECHIM	RS	Sul
43007	SANTO ANGELO	RS	Sul
43008	IJUI	RS	Sul
43009	CARAZINHO	RS	Sul
43010	PASSO FUNDO	RS	Sul
43011	CRUZ ALTA	RS	Sul
43015	VACARIA	RS	Sul
43016	CAXIAS DO SUL	RS	Sul
43017	SANTIAGO	RS	Sul
43018	SANTA MARIA	RS	Sul
43021	LAJEADO-ESTRELA	RS	Sul
43022	CACHOEIRA DO SUL	RS	Sul
43025	SAO JERONIMO	RS	Sul
43026	PORTO ALEGRE	RS	Sul
43028	CAMAQUA	RS	Sul
43029	CAMPANHA OCIDENTAL	RS	Sul
43030	CAMPANHA CENTRAL	RS	Sul
43031	CAMPANHA MERIDIONAL	RS	Sul
43032	SERRAS DE SUDESTE	RS	Sul
43033	PELOTAS	RS	Sul
43034	JAGUARAO	RS	Centro-oeste
50004	CAMPO GRANDE	MS	Centro-oeste
50005	CASSILANDIA	MS	Centro-oeste
50006	PARANAIBA	MS	Centro-oeste
50007	TRES LAGOAS	MS	Centro-oeste
50010	DOURADOS	MS	Centro-oeste
50011	IGUATEMI	MS	Centro-oeste
51001	ARIPUANA	MT	Centro-oeste
51002	ALTA FLORESTA	MT	Centro-oeste
51004	PARECIS	MT	Centro-oeste
51006	ALTO TELES PIRES	MT	Centro-oeste
51008	PARANATINGA	MT	Centro-oeste
51009	NORTE ARAGUAIA	MT	Centro-oeste
51010	CANARANA	MT	Centro-oeste
51017	CUIABA	MT	Centro-oeste
51020	TESOURO	MT	Centro-oeste
51021	RONDONOPOLIS	MT	Centro-oeste
51022	ALTO ARAGUAIA	MT	Centro-oeste
52004	PORANGATU	GO	Centro-oeste
52006	CERES	GO	Centro-oeste
52007	ANAPOLIS	GO	Centro-oeste
52012	ENTORNO DE BRASILIA	GO	Centro-oeste
52013	SUDOESTE DE GOIAS	GO	Centro-oeste
52014	VALE DO RIO DOS BOIS	GO	Centro-oeste
52016	PIRES DO RIO	GO	Centro-oeste
52017	CATALAO	GO	Centro-oeste
52018	QUIRINOPOLIS	GO	Centro-oeste
53001	BRASILIA	DF	Centro-oeste