

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**

**RODRIGO CAMILO**

**OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL NA CADEIA DE SUPRIMENTOS DE  
PRODUTOS DA HORTIFRUTICULTURA:**

---

**Desenvolvimento de Modelos de Programação Matemática  
para Gestão da Sustentabilidade**

Maringá - Paraná  
2017

RODRIGO CAMILO

**OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL NA CADEIA DE SUPRIMENTOS DE  
PRODUTOS DA HORTIFRUTICULTURA:**

---

**Desenvolvimento de Modelos de Programação Matemática  
para Gestão da Sustentabilidade**

**Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Química.**

Orientador: Prof. Dr. Mauro A. da Silva Sá Ravagnani

Maringá - Paraná  
Junho de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

C183o Camilo, Rodrigo  
Otimização sustentável na cadeia de suprimentos de produtos da hortifruticultura : desenvolvimento de modelos de programação matemática para gestão da sustentabilidade / Rodrigo Camilo. -- Maringá, 2017.  
[125] f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2017.

1. Otimização de processos. 2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). 3. Gestão da sustentabilidade. 4. Cadeia de suprimentos. 5. Produtos - Hortifruticultura. I. Ravagnani, Mauro Antonio da Silva Sá, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDD 23.ed. 660.281

GVS-003784

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

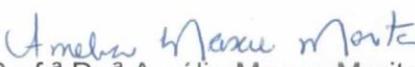
Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por Rodrigo Camilo perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 30 de junho de 2017.

COMISSÃO JULGADORA

  
Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani  
Orientador/Presidente

  
Prof.ª Dr.ª Thelma Pretel Brandão Vecchi  
Membro

  
Eng.ª Dr.ª Regiani Aparecida de Almeida  
Membro

  
Prof.ª Dr.ª Amélia Masae Morita  
Membro

  
Prof. Dr. Edwin Vladimir Cardoza Gladamez  
Membro

*Aos meus pais, Henrique e Maria*

*Ao meu amor, Hemine*

---

## AGRADECIMENTOS

---

Os meus sinceros agradecimentos são endereçados a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho. Em particular, gostaria de expressar a minha mais profunda gratidão a algumas pessoas especiais, sem as quais, inequivocamente, a realização deste sonho não teria sido possível:

Ao meu orientador desse trabalho, o Prof. Dr. Mauro Ravagnani pelas contribuições, direcionamentos, vivência e conhecimentos.

Aos meus pais, Henrique e Maria pelo carinho, paz, apoio e exemplo.

Aos meus irmãos pelo companheirismo, incentivo, risadas e estrutura.

A minha noiva Hemine pelo amor, compreensão, fé e felicidade.

Aos meus sobrinhos pela gentileza, alegria e esperança.

Aos meus amigos, pelos momentos de entusiasmo partilhados em conjunto.

A todos, muito obrigado!

“Agora, pois, permanecem a fé,  
a esperança e o amor, estes três;  
porém o maior destes é o amor”.

Paulo de Tarso

# **OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL NA CADEIA DE SUPRIMENTOS DE PRODUTOS DA HORTIFRUTICULTURA: DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA PARA GESTÃO DA SUSTENTABILIDADE**

**AUTOR: RODRIGO CAMILO**

**ORIENTADOR: PROF. DR. MAURO ANTONIO DA SILVA SÁ RAVAGNANI**

Defesa da Tese de Doutorado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, Bloco E46 – 09; CEP: 87020-900 – Maringá – PR, Brasil, apresentada em 30 de junho de 2017. 132 p.

## **RESUMO**

A Gestão da Sustentabilidade da Cadeia de Suprimentos (GSCS) é definida como um pensamento estratégico, transparente e integrado para atingir objetivos econômicos, sociais e ambientais numa coordenação sistêmica de processos interorganizacionais ao longo da cadeia de suprimentos (CS). As organizações vêm demonstrando um crescente interesse em minimizar os impactos do seu processo produtivo. Nesse sentido, um problema de GSCS pode ser formulado como um problema de otimização. Uma das formas para se incorporar as perspectivas ambientais e econômicas nos projetos de otimização é tratar os requisitos ambientais como um objetivo à parte, além do objetivo econômico, numa formulação multiobjetivo. Particularmente, a aplicação da GSCS é motivada pelo sistema de análise adotado, que abrange as fases do ciclo de vida do produto. Nesse contexto, é observado um importante crescimento da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como técnica de avaliação de impactos. A aplicação da ACV em conjunto com técnicas de Programação Matemática (PM) possibilita às organizações a avaliação acerca dos impactos de suas decisões, considerando uma diversidade de aspectos ao longo de toda a cadeia de suprimentos. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de modelos que auxiliem na gestão da sustentabilidade da cadeia de suprimentos (GSCS), especialmente na etapa de transporte de produtos da hortifruticultura do campo até o supermercado, envolvendo pequenos agricultores da região

do município de Umuarama, no Estado do Paraná, Brasil. Na formulação dos casos de estudo, foi realizada a descrição da CS estudada, para posterior formulação dos modelos de Programação Linear (PL). Para resolver o problema de otimização foi utilizado o ambiente GAMS, com o solucionador CPLEX. Na otimização multiobjectivo (OMO) foi utilizado o método  $\epsilon$ -restrição. As preferências foram articuladas na análise pós-ótima das soluções de Pareto obtidas para o problema. Os “pontos de joelho” foram utilizados como critério para a obtenção das Melhores Soluções Praticáveis (MSP) para o problema. Também foi realizado o estudo de indicadores de impactos ambientais, em primeiro plano com base em informações disponibilizadas pelos fabricantes de veículos automotores e em segundo plano com base na metodologia ReCiPe de ACV. Nesse sentido, os dados do inventário para o problema foram obtidos a partir de diferentes fontes: entrevistas com produtores, transportadoras, armazéns e supermercados e consulta ao banco de dados *ecoinvent* versão 3.3. A abordagem apresentada nesse trabalho propõe a maximização do objetivo lucro esperado, satisfazendo ao mesmo tempo, de maneira equilibrada os objetivos conflitantes custo e o objetivo impacto ambiental. Os resultados mostraram que as soluções obtidas pela abordagem proposta forneceram informações valiosas sobre o problema de desempenho da CS avaliada, ajudando os tomadores de decisão para adoção de alternativas para processos mais sustentáveis.

**Palavras-chave:** Otimização. Avaliação do Ciclo de Vida. Gestão da Sustentabilidade. Cadeia de Suprimentos. Produto da Hortifruticultura.

**SUSTAINABLE OPTIMIZATION IN THE SUPPLY CHAIN OF  
HORTIFRUITICULTURE PRODUCTS: DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL  
PROGRAMMING MODELS FOR SUSTAINABILITY MANAGEMENT**

**AUTHOR: RODRIGO CAMILO**

**SUPERVISOR: PROF. DR. MAURO ANTONIO DA SILVA SÁ RAVAGNANI**

Defense of the Doctoral Thesis; Graduate Program in Chemical Engineering; State University of Maringá; Av. Colombo, 5790, Block E46-09; CEP: 87020-900 - Maringá - PR, Brazil, filed on June 30, 2017. 132 p.

**ABSTRACT**

Supply Chain Sustainability Management (SCSM) is defined as a strategic, transparent and integrated thought to achieve economic, social and environmental goals in a systemic coordination of interorganizational processes of the supply chain (SC). Organizations have been demonstrated a growing interest in minimizing impacts of their production process. In that sense, a SCSM problem can be formulated as an optimization problem. One way of incorporate environmental and economic perspectives into optimization projects is to treat environmental requirements as a separate objective, besides the economic objective, in a multiobjective formulation. In particular, the application of SCSM is motivated by the analysis system adopted which covers the phases of the product life cycle. In this context, an important growth of the Life Cycle Assessment (LCA) is observed as an environmental impact assessment technique. The combination of LCA together with techniques of with Mathematical Programming (MP) enables organizations to assess impacts of their decisions considering a variety of aspects throughout the supply chain. The objective of this study is the development of that help in the management of the supply chain sustainability (SCSM) geared towards to the transportation of products from the hortifruticulture field to the supermarket, involving small farmers in the region of the municipality of Umuarama, in the State of Paraná/Brazil. In the formulation of the case studies, a description of the studied SC is made, for later formulation of the Mixed Integer Linear Programming (MILP) model. GAMS software was used to solve the optimization problems with the CPLEX solver. In addition, the study of environmental impact indicators is carried out in the foreground based on information provided by automobile manufacturers, in the background based on the ReCiPe

methodology. Then, the inventory data for the problem were obtained from different sources: interviews with producers, transporters, warehouse and supermarkets; consulting theecoinvent version 3.3 database. In multiobjective optimization (MOO) the  $\epsilon$ -restriction method is adopted. The preferences were articulated in the post-optimal analysis of the Pareto solutions obtained for the problem. The "knee points" were determined as criteria to obtain the Best Practical Solutions (BPS) for the problem. The approach presented in this tesis proposes solutions to achieve the objective of the expected maximized profit, satisfying the objective cost and the environmental impact objectives. The results showed that the solutions obtained by the proposed approach provided valuable information about the performance of the CS evaluated, helping decision makers to adopt and elaborate more sustainable process alternatives.

**Key words:** Optimization. Life Cycle Assessment. Sustainability Management. Supply chain. Horticultural products.

---

## SUMÁRIO

---

RESUMO.....	8
ABSTRACT .....	5
LISTA DE ABREVIATURAS.....	8
CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO:.....	9
1.1 GESTÃO DA SUSTENTABILIDADE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS .....	9
1.2 MOTIVAÇÃO .....	12
1.3 OBJETIVOS .....	16
1.4 ESTRUTURA DA TESE .....	17
CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE: .....	18
2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) .....	18
2.1.1 Princípios de ACV .....	18
2.1.2 ACV de Produtos da Hortifruticultura .....	23
2.1.3 A metodologia de ACV .....	27
2.1.4 Avaliação Ambiental, Econômica e Social .....	30
2.2. PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA .....	35
2.2.1 Programação Linear .....	35
2.2.2 Otimização multiobjetivo .....	38
2.2.3 Fronteira de Pareto .....	40
2.2.4 O método $\varepsilon$ -restrição .....	41
2.2.5 Ambiente GAMS .....	42
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA:.....	44
3.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS DA ACV .....	44

3.1.1. Definição de objetivo e escopo _____	45
3.1.2. Análise do inventário _____	46
3.1.3. Avaliação de impacto _____	47
3.1.4. Interpretação _____	50
<b>3.2. ASPECTOS METODOLÓGICOS DOS MODELOS MATEMÁTICOS ____</b>	<b>50</b>
3.2.1 Estruturas integradas de engenharia e de negócios _____	50
3.2.2 Modelo de Programação Linear (PL) _____	51
3.2.3 GAMS/CPLEX _____	53
3.2.4 Fronteira de Pareto _____	53
3.2.5 O método $\varepsilon$ -restrição _____	53
3.2.6 Ponto de Joelho _____	54
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS: .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1. MODELO DE PL PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ECONÔMICA DA CS DE TOMATES .....</b>	<b>55</b>
4.1.1 Definição do Problema (etapa 1).....	55
4.1.2 Estudo de Caso (etapa 2).....	56
4.1.3 Modelo (etapa 3).....	57
4.1.4 Resultados (etapa 4).....	58
4.1.5 Conclusões (etapa 5) .....	60
<b>4.2. MODELO DE PL PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE DIFERENTES CENÁRIOS PROPOSTOS PARA CS DE TOMATES _____</b>	<b>61</b>
4.2.1. Declaração do problema (etapa 1) _____	61
4.2.2. Casos de estudo (etapa 2) _____	61
4.2.3 Modelo (etapa 3) _____	64
4.2.4 Resultados (etapa 4) _____	65
4.2.5. Conclusões (etapa 5) _____	69

<b>4.3. MODELO DE PL PARA OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DA CS DE TOMATES UTILIZANDO DIFERENTES INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>70</b>
4.3.1 Definição do problema (etapa 1)	70
4.3.2 Caso de estudo (etapa 2)	70
4.3.3 Modelo (etapa 3)	72
4.3.4 Resultados (etapa 4)	73
4.3.5 Conclusões (etapa 5)	82
<b>4.4. MODELO PARA GESTÃO DA SUSTENTABILIDADE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DE TOMATES E ALFACE UTILIZANDO OS INDICADORES: AMBIENTAL, ECONÔMICO E SOCIAL.</b>	<b>84</b>
4.4.1. Declaração do Problema (etapa 1)	84
4.4.2. Casos de estudo (etapa 2)	84
4.4.3 Modelo (etapa 3)	85
4.4.4 Resultados (etapas 4)	89
4.4.5. Conclusão (etapa 5)	93
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES GERAIS:</b>	<b>94</b>
5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	94
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>99</b>
Anexo A1 – <i>midpont</i> Caso 1	106
Anexo A2 – <i>endpoint</i> Caso 1	118
Anexo B1 – <i>midpoint</i> Caso 2	123
Anexo B2 – <i>endpoint</i> Caso 2	128

---

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AG	Aquecimento Global
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
AIA	Avaliação de Impactos Ambientais
AP	Potencial de Acidificação
BCB	Banco Central Brasileiro
CB	Caso Base
CE	Comissões de Estudo
CEASA	Centrais Estaduais de Abastecimento
CO	Compostagem
CO <sub>2</sub> eq.	CO <sub>2</sub> equivalente
COOPERU	Cooperativa dos Produtores de Umuarama
CS	Cadeia de Suprimentos
DA	Depleção Potencial Abiótica
DO	Depleção da Camada de Ozônio
EAD	Ecotoxicidade de Água Doce
EAM	Ecotoxicidade de Água Marinha
ET	Ecotoxicidade Terrestre
GCS	Gestão da Cadeia de Suprimentos
GEE	Gases do Efeito Estufa
GH	Estufa
GVCS	Gestão Verde da Cadeia de Suprimentos
GSCS	Gestão da Sustentabilidade da Cadeia de Suprimentos
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
MSP	Melhor Solução Praticável

MOAP	Melhores Opções Ambientais Praticáveis
OF	Cultivo em Campo Aberto
OFP	Oxidação Fotoquímica Potencial
OMO	Otimização Multiobjetivo
PL	Programação Linear
PM	Programação Matemática
PMO	Problema Multiobjetivo
PMI	Programação Mista Inteira
PMM	Programação Matemática Multiobjetivo
PLMI	Programação Linear Mista Inteira
pts	Pontos
SG	Sigla
TH	Toxicidade Humana
UF	Unidade Funcional

---

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO:

### **GSCS, motivação, objetivos e estrutura da tese**

---

Neste capítulo são apresentadas as principais motivações para a realização deste estudo, assim como os objetivos que norteiam o desenvolvimento do trabalho e a estrutura organizacional da tese.

#### 1.1 GESTÃO DA SUSTENTABILIDADE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

A Gestão da Sustentabilidade tem apresentado crescente interesse entre acadêmicos e gerentes que atuam na cadeia de suprimentos. A Gestão da Sustentabilidade da Cadeia de Suprimentos (GSCS) é definida como um pensamento estratégico, transparente e integrado para atingir objetivos econômicos, sociais e ambientais numa coordenação sistêmica de processos organizacionais ao longo da cadeia (SEURING e MULLER, 2008).

Guillén-Gosálbez *et al.* (2008), enfatizam o surgimento do campo da Gestão Verde da Cadeia de Suprimentos (GVCS) em resposta à atual situação vivenciada. Esta área aborda a influência e as relações entre a Gestão da Cadeia de Suprimentos (GCS) e o ambiente natural. A GVCS reconheceu o papel desempenhado pela GCS com relação à sustentabilidade, bem como a possibilidade do aproveitamento desta para, holisticamente, avaliar o desempenho ambiental de um processo. Segundo Kostin *et al.* (2011), a GCS ganhou recentemente um maior interesse no meio acadêmico e industrial, especialmente pelo potencial de aumentar os benefícios com o uso de coordenação eficaz sobre as operações de fornecimento, fabricação e distribuição realizadas.

Embora os conceitos de GVCS e GSCS tenham ganhado delineamentos diferenciados entre si, é difícil deixar de considerar a significativa coincidência de abrangência quanto às classificações “verde” e “sustentável” no âmbito de estudo da cadeia produtiva. Barbieri *et al.* (2014) afirmam que a “gestão verde” da cadeia não inclui explicitamente a dimensão social. Já Ashby *et al.* (2012), que também revisaram estudos relacionando a forma como a sustentabilidade é abordada na cadeia produtiva, observam que o aspecto sustentável ainda

está polarizado nas iniciativas ambientais e econômicas, enquanto a dimensão social é apresentada de forma superficial, apesar de sua relevância.

De fato, as empresas já têm percebido e acolhido essa tendência, buscando apresentar seus resultados em triplo critério, ou seja, o *Triple Bottom Line*. Segundo Dias (2017) esse conceito também conhecido como 3 Ps da sustentabilidade, se refere a um conjunto de objetivos e processos que uma organização deve focar para criar valor em três dimensões: econômico, social e ambiental. Na prática, as atividades de distribuição e produção realizadas por uma empresa são geralmente avaliadas em especial pela capacidade de aumentar as suas receitas globais. Assim, utiliza-se o benefício econômico como indicador de desempenho. Portanto, o processo tradicional de projeto e otimização é baseado em objetivos econômicos, como, por exemplo o custo de distribuição. No entanto, as variáveis ambientais e sociais precisam ser observadas.

Com relação aos impactos ambientais da cadeia de suprimentos, a eles é dada baixa prioridade e estes são normalmente incorporados na concepção tradicional como o tratamento de *end-of-pipe* (fim da linha). Esse procedimento de projeto pode, muitas vezes, ignorar a produção de grandes quantidades de materiais que geram resíduos e causam poluição ao longo da cadeia produtiva. Este fato foi observado nas últimas décadas. Como resultado do aumento dos custos de controle ambiental e regulamentos ambientais emitidos, as indústrias demonstram crescente interesse em minimizar os impactos ambientais do processo de projeto (Chen *et al.* 2002). Nesse sentido, um problema de GSCS pode ser formulado como um problema de otimização.

A otimização, do ponto de vista matemático, faz parte de uma área da ciência computacional que busca encontrar o melhor valor para problemas em que a qualidade de uma resposta pode ser medida por um número. Uma das formas para se incorporar as perspectivas ambientais e sociais nos projetos de otimização, é tratar esses requisitos como objetivos, focados na otimização multiobjetivo. Este fato foi observado nas décadas anteriores, em que o campo da otimização multiobjetivo (OMO) obteve crescimento significativo e muitas aplicações de engenharia são representadas e relatadas na literatura (Guillén-Gosálbez *et al.*, 2008).

Consoante a isso, o uso de Programação Matemática na GSCS oferece a possibilidade de realizar uma otimização simultânea das operações do processo, bem como encontrar soluções eficientes para um problema multiobjetivo (PMO). O conjunto de soluções eficientes de um PMO é chamado de fronteira de Pareto. Infelizmente, a OMO é bastante sensível ao número de objetivos considerados na análise, principalmente porque tanto o

cálculo das soluções de Pareto como sua visualização e análise se tornam mais complexas à medida que a quantidade de critérios é aumentada (Carreras *et al.* 2016). Além disso, o projeto de cadeia de suprimentos sustentável é um problema complicado pelo alto grau de incerteza em especial pelos fatores externos (demandas, preços, custos, entre outros), bem como fatores internos (rendimentos do produto, inventário de ciclo de vida, entre outros). Particularmente, a aplicação da GSCS é motivada pelo sistema de análise adotado, que abrange todas as fases do ciclo de vida do produto.

Por ciclo de vida, entende-se como sendo as etapas necessárias para que um produto ou serviço seja desenvolvido, cumprindo a respectiva função. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método de avaliação de sustentabilidade, que considera os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto. Um ciclo de vida completo é composto por todas as suas fases que são a aquisição, a produção, a distribuição, a utilização e a eliminação. A ACV segue um quadro geral em que os impactos ambientais são identificados, quantificados e interpretados, de acordo com uma proposta de avaliação de impactos.

A avaliação de impactos ambientais é fundamental para compatibilizar o desenvolvimento econômico e social com a preservação do meio ambiente. No Brasil, a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) envolve um conjunto de métodos e técnicas de gestão ambiental reconhecidas, com a finalidade de identificar, prever e interpretar os efeitos e impactos sobre o meio ambiente. Em todo mundo, a AIA foi formalizada e consolidada pela via legal, sendo apenas um dos instrumentos empregados para compatibilizar desenvolvimento econômico e social com proteção e melhoria da qualidade ambiental, tratada como ideal para o desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, é observado um importante crescimento da ACV como técnica de AIA. Isso resulta na tomada de consciência, muito frequentemente para melhorias de processos, induzindo a efeitos secundários ao longo do ciclo de vida que conduzem à otimização do comportamento ambiental do produto ou serviço, ou ainda, para apoiar processos de tomada de decisão. Uma abordagem inovadora para GCS exige um quadro geral de otimização incorporando múltiplas dimensões. Diferentes técnicas de ACV em conjunto com técnicas de programação matemática permitem que indivíduos e/ou empresas possam avaliar o impacto ambiental de suas decisões considerando uma diversidade de aspectos (ambientais e econômicos e sociais) ao longo de toda a cadeia de suprimentos.

A ACV é baseada em modelos homogêneos lineares, irrestritos às atividades econômicas humanas e ao seu efeito sobre o meio ambiente, ou seja, encargos ambientais e seus impactos são considerados diretamente proporcionais ao número de unidades funcionais

produzidas. Uma vez que na realidade, praticamente todos os sistemas estão sujeitos a um número de restrições, é necessária uma abordagem mais poderosa para a análise do sistema e otimização na ACV. A abordagem aqui proposta utiliza a Programação Linear (PL) para modelar o comportamento de um sistema linear sujeito a restrições.

A abordagem de PL se apresenta valiosa na fase de melhoria do desempenho ambiental, econômico e social de uma cadeia de suprimentos. Segundo Azapagic e Clift (1998), o modelo PL identifica o intervalo de soluções ótimas para desempenhos ambientais melhorados que podem ser alcançados através de várias modificações no sistema de produto, incluindo mudanças no desempenho econômico. Assim, combinando ambos os critérios ambientais e socioeconômicos, esta abordagem permite a identificação das Melhores Opções Ambientais Praticáveis (MOAP) sem acarretar custos excessivos.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

No atual momento, ocorre um esforço significativo de investigação que é intensificado e dedicado a ampliar os limites de análise para capturar um conjunto de práticas de negócios que levem em consideração questões de grande relevância como criar condições para que a agricultura de pequeno porte seja sustentável. Essa tendência busca a motivação especialmente pela oportunidade também de se obter maiores benefícios por meio da gestão integrada de toda a cadeia de suprimentos, agregando também aspectos sociais e econômicos, contribuindo para os avanços na área de controle e desenvolvimento de processos em três níveis de decisão: produtores, armazéns e supermercados.

A questão da sustentabilidade no primeiro nível de decisão é importante em função do papel dos pequenos produtores na produção de alimentos no Brasil e da crescente preocupação da sociedade com os impactos das atividades humanas no meio ambiente. Nogueira e Schmukler (2017) consideram a agricultura de pequeno porte como o conjunto de produtores rurais que operam nos menores módulos de produção e utilizam mão de obra da família, o que inclui produtores de frutas e verduras. É importante destacar nesse setor que a geração de alimentos para a subsistência pode eventualmente ocorrer como subproduto do sistema, mas o foco deve ser a geração de renda ao produtor. Uma das condições para a viabilidade econômica das atividades de pequenos produtores rurais é a gestão dos custos. Como os pequenos produtores não podem influenciar nos preços em mercados, a gestão de custos pode ser uma ferramenta para aumentar a margem de lucro a ser obtida. De maneira

especial, os pequenos produtores conseguem obter rendas suficientes na produção de frutas e verduras, que são mais intensivas em mão-de-obra. Nesse sentido, quando falamos sobre o aspecto social nas atividades desempenhadas por pequenos produtores rurais, geralmente considera-se a desigualdade de renda.

Se a agricultura de pequeno porte consegue sobreviver em determinado mercado, esta condição em si já seria um indicador de que o ambiente competitivo admite algum grau de distribuição de renda. Entretanto, deve-se aprofundar a análise para que possa conhecer as perspectivas do produtor conforme as tendências daquele mercado. Ainda segundo Nogueira e Schmukler (2017) a área com maior possibilidade de se obter resultados de curto prazo parece ser a de convivência comunitária, visto que a existência de cooperativas de produtores rurais é bastante disseminada no Brasil. Essas entidades, se devidamente apoiadas por parceiros públicos ou privados, podem se transformar em facilitadores para a melhoria das condições sociais dos pequenos produtores. Por meio delas é possível realizar ações de educação básica ou cursos de capacitação profissional, estratégias coletivas de compras ou comercialização e discussão de iniciativas relacionadas às demais carências sociais.

De acordo com informações do Ministério do Desenvolvimento Agrário (2016) os pequenos agricultores respondem por mais de 70% dos alimentos consumidos em todo o País. De acordo com o último Censo Agropecuário (2006), foram identificados 4.367.902 estabelecimentos da agricultura familiar, o que representa 84,4% dos estabelecimentos brasileiros. Dos 80,25 milhões de hectares da agricultura de pequeno porte, apenas 17,0% eram destinados a lavouras. Apesar de cultivar uma área menor com lavouras, os agricultores de pequeno porte são responsáveis por garantir boa parte dos alimentos consumidos no Brasil, sendo considerados importantes fornecedores de alimentos para o mercado interno. Na época do último Censo a agricultura de pequeno porte respondia por um terço das receitas dos estabelecimentos agropecuários brasileiros e já se pensava sobre a organização dos pequenos produtores em cooperativas.

Por conseguinte, a crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos têm aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e lidar com impactos negativos. Nesse contexto, a ACV pode ser utilizada para avaliar uma ampla gama de produtos e atividades, como produção de alimentos e alternativas de transporte em etapas específicas do ciclo de vida de um produto. Assim, existe um interesse crescente por essa técnica de avaliação de impactos ambientais no sistema de beneficiamento de alguns produtos da hortifruticultura (KHOSHNEVISAN *et. al.*, 2013).

Em meados do século XX, todos os produtos agroindustriais, presentes no Brasil, eram comercializados nas populares “feiras livres”, onde o mercado era aberto para toda população. Assim, com fiscalizações intensificadas, aplicando leis e resoluções, e aumento da população das grandes cidades, devido à formação do êxodo rural, o Estado começou a se preocupar com a questão da distribuição de alimentos, mais especificamente com as hortifrutícolas, por serem perecíveis. Já na década de 1970, buscando organizar a oferta para o abastecimento das grandes cidades, foi constituído o Sistema de CEASA, o qual também tem a incumbência de armazenamento temporário dos produtos num segundo nível decisão. Estima-se que, atualmente, 60 % da quantidade de hortaliças consumida no país seja comercializada nessas centrais de abastecimento (LUENGO e JUNQUEIRA, 2009). Na região noroeste do Estado do Paraná, Brasil, está instalada a “COOPERU” que é uma Cooperativa de Pequenos Produtores Rurais. Essa cooperativa possui cerca de 200 cooperados, que além de receber assessoria técnica especializada, dispõem de armazéns para recepção e vendas de produtos da hortifruticultura. Essa organização atende ao mercado regional, fornecendo produtos para supermercados, escolas e programas sociais da região do município de Umuarama.

No cenário atual, a participação dos supermercados na venda de frutas e verduras apresentou forte crescimento (LOURENÇO e KATZ, 2010). Há aplicação de novas normas e resoluções, todas destinadas à qualidade das hortifrutícolas e seus distribuidores. Assim, depois de produtores e armazéns, num terceiro nível de decisão, estão os supermercados, que são grandes responsáveis pelo processo de transformação na esfera do consumo alimentar fornecendo um conjunto de novas opções. Os avanços na tecnologia de embalagens, processamento de alimentos, sistemas de distribuição, entre outros, possibilitaram a difusão de um ambiente limpo e atraente nos supermercados, existindo ainda oportunidades de melhoria de qualidade e eficiência, particularmente nas seções de “Hortifruti”, onde o controle sanitário visa, entre outras coisas, minimizar as perdas com deterioração (Fellows, 2006). Observa-se ainda, que tem sido intenso o movimento em busca de novos mecanismos de sobrevivência para produtores rurais, administradores de armazéns e mercados (franquias, parcerias comerciais, e constituição de empresas comuns) para admitir sócios que disponham de capitais necessários para a exploração ou ampliação de empreendimentos. Da mesma forma, as cooperativas se inserem nesse movimento de busca de alternativas, como uma organização de produtores rurais.

Apesar dos investimentos crescentes feitos para gestão ambiental de produtos frutihortícolas, muito se perde ou acaba tendo destinação final incorreta, seguindo muitas vezes para aterros sanitários, onde o confinamento não permite o aproveitamento desses

materiais. Garnett (2006) relata sobre o desperdício de alimentos que representa também um desperdício de energia utilizada na produção, processamento, armazenamento e transporte de hortaliças e verduras, e, como resultado do desperdício, pode se ter um aumento nas emissões de gases do efeito de estufa. De acordo com Zhang *et al.* (2014) uma melhoria no discernimento sobre a estrutura e o funcionamento da cadeia de suprimentos pode influenciar nas emissões para o meio ambiente, pois aumentariam significativamente as oportunidades de melhoramento no desempenho em toda a cadeia. Melhorias nas quantidades transportadas, por exemplo, podem se traduzir em grandes reduções de custos (Jiang e Grossmann, 2015). Berger (1975) afirma que a distância é o fator mais importante no custo de transporte.

Uma das causas da grande quantidade de impactos ambientais gerados no transporte de produtos da hortifruticultura, em nível de Brasil, é a carência de estudos mercadológicos de todo o complexo comercial dos produtos, que poderiam fornecer valiosas informações e contribuir para minimização de impactos. Nesse contexto, modernas ferramentas de apoio para avaliação de impactos ambientais e otimização de processos são pouco utilizadas especialmente no Brasil. De maneira análoga, o correto manuseio de insumos, produtos e embalagens desde os fornecedores, ao longo do processo de produção e durante a distribuição até o consumidor, é essencial para aperfeiçoar a qualidade do produto ao longo do seu ciclo de vida.

A produção de hortifrúti no Brasil tem importância fundamental, devido à riqueza alimentar e o consumo crescente. No Estado do Paraná os produtores de oleícolas são essencialmente pequenos produtores, sendo a área média de cada propriedade de aproximadamente 3,0 hectares. A olericultura está presente em cerca de 13% das 300.000 propriedades familiares existentes no Paraná (SALVADOR, 2016). De acordo com dados da Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento no ano de 2015 o Estado do Paraná produziu no setor 3,03 milhões de toneladas, em uma área cultivada em torno de 115,5 mil hectares, e o mercado movimentou aproximadamente R\$ 4,03 bilhões. O tomate teve a terceira maior produção, com cerca de 276,2 mil toneladas. A alface teve a sexta maior produção, 128,2 mil toneladas. Dentre os principais produtos cultivados o tomate foi o segundo produto de maior valor, cerca de 584,1 milhões de reais. Isso mostra que, do grupo das hortaliças, o tomate e a alface são as espécies importantes, tanto sob o ponto de vista econômico, quanto social, seja pelo volume da produção ou pela geração de empregos. Essa produção tem uma participação considerada importante na região de Umuarama, gerando renda principalmente para pequenos produtores rurais.

Consoante a isso, a agricultura de pequeno porte deve estar alinhada com as exigências básicas de: minimização de custo, melhorias na renda e controle da emissão de gases de efeito estufa. A redução dos custos depende das soluções tecnológicas e de planejamento adotadas pelos pequenos produtores. A falta de capacitação e de acesso às informações para modernização da atividade desempenhada afetam, além da gestão dos custos envolvidos, a capacidade de decisão do produtor quanto as estratégias de manejo das culturas, diminuindo muitas vezes, a margem de lucro que poderia ser obtida. No entanto, dentro dos sistemas de produção convencionais, sempre há espaço para otimizar o uso de recursos como combustíveis, por exemplo, desde que o produtor tenha acesso à fronteira do conhecimento para aquela atividade. A redução do uso de combustíveis fósseis é extremamente necessária uma vez que os gases de efeito estufa (GEE) liberados pelo escapamento de veículos automotores são agentes em potencial das mudanças que acontecem no clima.

Nesse contexto, são significativos os impactos gerados na etapa de transporte da cadeia de suprimentos que envolve um conjunto de pequenos produtores rurais. Não existem estudos relevantes aplicados a esse caso, principalmente quando se propõe desenvolver modelos que apresentem interações entre objetivos econômicos, ambientais e sociais. Assim, é relevante se pensar em formas de minimizar os impactos ambientais negativos na cadeia de suprimentos de produtos da hortifruticultura, buscando também redução de custos e benefícios sociais.

### 1.3 OBJETIVOS

#### Objetivo Geral

O presente trabalho utiliza princípios de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Programação Matemática (PM), com o objetivo de desenvolver modelos que auxiliem na Gestão da Sustentabilidade da Cadeia de Suprimentos (GSCS), especialmente no transporte de produtos da hortifruticultura do campo até o supermercado, envolvendo pequenos agricultores da região do município de Umuarama, no Estado do Paraná, Brasil.

#### Objetivos específicos

- Delimitar e levantar dados sobre a cadeia de suprimentos (CS) em estudo;
- Desenvolver modelos de Programação Linear (PL) para gestão sustentável da CS, envolvendo pequenos produtores, armazéns e supermercados;

- Estudar indicadores ambientais associados às emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), em especial na etapa de transporte do produto utilizando métricas de ACV;
- Aplicar a otimização multiobjetivo ( $\epsilon$ -restrição) para resolver problemas que envolvem indicadores ambientais, econômicos e sociais.

Nesta perspectiva, e no âmbito da otimização multiobjetivo, por meio da aplicação de métodos apropriados, pretende-se determinar soluções ótimas que correspondam à minimização de custos de transporte, maximização do lucro de sustentabilidade, bem como a minimização dos impactos ambientais, respeitando as restrições envolvidas nesse processo.

## 1.4 ESTRUTURA DA TESE

A organização do conteúdo desta tese é a seguinte: o presente capítulo descreve conceitos fundamentais sobre a gestão da sustentabilidade, apresentando aqui também a motivação para o desenvolvimento do estudo, e os objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica referente aos temas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Programação Matemática, incluindo o detalhamento das abordagens: Programação Linear, otimização multiobjetivo, soluções de Pareto, método  $\epsilon$ -restrito e otimização sustentável.

No Capítulo 3 são apresentados os aspectos da metodologia de ACV e aspectos metodológicos dos modelos matemáticos avaliados e utilizados como base para o desenvolvimento desse trabalho.

No Capítulo 4 serão apresentados os modelos matemáticos aqui desenvolvidos para: avaliação de desempenho, estudo de indicadores ambientais, otimização sustentável e gestão da sustentabilidade da cadeia de suprimentos. Cada modelo será apresentado em cinco etapas de acordo a metodologia proposta para esse trabalho: I) definição do problema, II) estudo de caso, III) modelo, IV) resultados e V) conclusões.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, incluindo as principais contribuições provenientes do desenvolvimento de cada modelo em particular, assim como sugestões para trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento desse trabalho, e apêndices.

---

## CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE:

### **Avaliação do Ciclo de Vida e Programação Matemática**

---

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica referente ao tema Avaliação do Ciclo de Vida – princípios, aplicação, metodologia e novas perspectivas. Também são apresentados aspectos da Programação Matemática, incluindo o detalhamento das abordagens: Programação Linear, otimização multiobjetivo, fronteiras de Pareto, método  $\varepsilon$ -restrito e ambiente GAMS.

#### 2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

##### 2.1.1 Princípios de ACV

O primeiro registro de Avaliação do Ciclo de Vida remonta à década de 1960, quando foram realizados os primeiros estudos. Essa técnica é baseada em um exame sistemático dos impactos ambientais de produtos com o objetivo de revelar a dimensão ambiental da sustentabilidade. Um estudo da ACV fornece informações e também apoio na procura de possíveis respostas para os problemas ambientais relacionados com o ciclo de vida dos produtos ou processos (GOEDKOOOP *et al.*, 2013).

A ACV, conhecida internacionalmente por LCA (*Life Cycle Assessment*), é uma técnica de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) associada a um produto ou serviço, durante o seu ciclo de vida (FERRÃO, 1998). Com relação ao termo “avaliação de impacto ambiental”, de acordo com Sánchez (2013), o mesmo refere-se a um instrumento de política ambiental adotado em inúmeras jurisdições. Ações de controle dos impactos significativos identificados, de acordo com normas e instrumentos de política ambiental, são descritas nos planos de gestão.

O sistema da ISO 14.000 (ABNT, 2015) é baseado em normas provindas de sistemas de gestão, rotulagem ambiental (selo verde), integração de aspectos ambientais no desenho de produtos (ecodesign) e desempenho ambiental da ACV (equivalente à avaliação de impactos ambientais de produtos). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro

Nacional de Normatização. As normas brasileiras provêm de conteúdos de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), e são elaboradas por Comissões de Estudo (CE) formadas por produtores, consumidores, universidades, entre outros. A ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009) (Gestão Ambiental – ACV – Requisitos e orientações) foi traduzida pelo Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental e pela Comissão de Estudo de Avaliação do Ciclo de Vida. O mesmo grupo também elaborou a ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) (Gestão Ambiental – ACV – Princípios e estrutura).

A ISO 14040 e a ISO 14044 especificam orientações para a Avaliação do Ciclo de Vida. Estas normas abrangem os estudos de Avaliação do Ciclo de Vida e os estudos de Inventário do Ciclo de Vida (ICV). A aplicação pretendida para os resultados da ACV ou da ICV é considerada durante a definição do objetivo e escopo. A principal diferença entre as duas normas é que a ISO 14040 não descreve detalhadamente a técnica de ACV nem especifica metodologias para as fases individuais da ACV.

A ISO 14040 e a ISO 14044 trazem algumas definições importantes, listados a seguir:

- alocação – repartição dos fluxos de entrada e saída de um processo ou sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e outros sistemas de produto;
- unidade funcional – desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência;
- sistema de produto – conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto;
- fronteira do sistema – conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto;
- categoria de impacto – classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associadas;
- ciclo de vida – estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final;
- ACV – compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida;
- ICV – fase da ACV envolvendo a compilação e quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida;

- Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) – fase da ACV que visa ao entendimento e à avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida.

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNRS), Lei nº12305/2010, em seu Art. 3º, parágrafo IV, define o ciclo de vida como sendo uma série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final. Ainda, segundo a lei supracitada, para que as etapas do ciclo de vida sejam consolidadas, é importante que sejam firmados acordos setoriais. Esses contratos são estabelecidos entre o poder público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes, tendo em vista a implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto. Compartilhar as responsabilidades significa estabelecer um conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas. Essas atividades devem ser realizadas pelos fabricantes, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos.

De maneira sucinta, os requisitos da ABNT NBR ISO 14044 que devem ser aplicados na execução de uma ACV são:

- objetivo e escopo – que devem ser claramente definidos e devem ser consistentes com a aplicação pretendida. Além disso, o objetivo deve levar em consideração as razões para realização do estudo e o público-alvo. O escopo deve levar em consideração e descrever de maneira clara a unidade funcional, a fronteira do sistema, a metodologia da AICV, os tipos e a qualidade dos dados;
- análise de inventário – é um processo iterativo. À medida que dados são coletados e se amplia o conhecimento sobre o sistema, novos requisitos podem ser identificados. Os principais passos operacionais são o processamento com os dados, bem como alocação de fluxos e liberações;
- avaliação de impacto – esse processo envolve associar dados do inventário com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria, tentando dessa forma entender os impactos. Essa fase tem como elementos obrigatórios a seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização; e também os processos de classificação e caracterização referentes a esses elementos;
- interpretação – é a fase em que as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto. Convém que a fase de interpretação forneça

resultados que sejam consistentes com o objetivo e o escopo definidos e que levem a conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações;

- comunicação e revisão crítica – os resultados e conclusões da ACV devem ser reportados ao público-alvo de forma completa, precisa e imparcial. Deve ser feita uma revisão para verificar se a ACV satisfaz os requisitos no que diz respeito à metodologia, dados, interpretação e comunicação, de acordo com os princípios.

A noção de unidade funcional responde à necessidade de quantificação do desempenho do produto ou serviço ao executar uma função que lhe está associada. É a construção de uma referência, em relação ao inventário a ser implantado, ou seja, se determinarão os dados de entrada e saída (FERRÃO, 1998). Essa unidade deverá descrever uma função relacionada com uma utilização mensurável, devendo tomar cuidados especialmente para a variação que possa ocorrer no resultado durante as pesquisas, especialmente quando trabalhar com dois ou mais métodos de produção. Para tentar resolver esse problema é necessário fazer a escolha correta da unidade funcional e, inclusão de valores econômicos nas pesquisas, especialmente sobre a qualidade dos dados a serem levantados.

Com relação à fase de interpretação, os resultados da ACV são analisados, e um conjunto de conclusões e recomendações para o sistema é formulado. Neste sentido, o objetivo final da ACV é fornecer critérios e medidas quantitativas para comparar diferentes alternativas de operação e projeto do processo.

De maneira geral, a análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a fase da ACV na qual é realizada a coleta de dados e quantificação de todas as variáveis (matéria-prima, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes, resíduos sólidos, entre outros) que relacionam o ciclo de vida de um produto, processo e atividade (SEO e KULAY, 2006). O inventário constitui o núcleo do estudo da ACV, sendo-lhe atribuída parte do tempo associado a qualquer estudo do tipo.

O Handbook de ILCD da European Commission (2010) mostra orientações diferenciadas para as principais situações-alvo enfrentadas na prática de ACV. Nesse sentido, cita que é necessário acrescentar muitos detalhes e especificar e esclarecer em maior profundidade as disposições das normas ISO 14040 e 14044 a partir da perspectiva das três principais situações-alvo de estudos de ACV:

- Situação A (“apoio decisório no nível micro”): apoio a decisões no nível micro, tipicamente para questões relacionadas a produtos. Parte-se da premissa de que as “decisões no nível micro” só têm consequências limitadas e não estruturais fora do contexto das decisões, ou seja, que elas não alteram a capacidade de produção

disponível. Seus efeitos são pequenos demais para ultrapassar o limiar necessário para provocar as chamadas consequências em larga escala no sistema de segundo plano (background system) ou em outras partes da tecnosfera.

- Situação B (“apoio decisório no nível meso/macro”): apoio a decisões em nível estratégico (por exemplo, sobre estratégias para matérias-primas, cenários tecnológicos, opções em termos de políticas, etc.). Parte-se da premissa de que as “decisões no nível meso/macro” têm também consequências estruturais fora do contexto das decisões, ou seja, que elas podem efetivamente alterar a capacidade de produção disponível. A decisão analisada individualmente pode gerar consequências em grande escala no sistema básico ou em outras partes da tecnosfera.
- Situação C (“Contabilização”): documentação puramente descritiva do sistema em análise (por exemplo, um produto, setor ou país), sem abordar quaisquer possíveis consequências para outras partes da economia. A Situação C tem dois subtipos: Situação C1, que inclui benefícios existentes fora do sistema analisado (por exemplo, créditos, benefícios de reciclagem existentes), e Situação C2, que não inclui esses benefícios.

Segundo o Handbook de ILCD da European Commission (2010) a modelagem atribucional é uma estrutura de modelagem de ICV que faz o inventário dos fluxos de entrada e saída de todos os processos de um sistema à medida que eles ocorrem. Um processo de modelagem ao longo de uma cadeia de abastecimento existente enquadra-se nesse tipo. Particularmente, a aplicação da gestão da sustentabilidade na CS é motivada pelo sistema de análise adotado, que pode abranger todas as fases do ciclo de vida do produto ou algumas de suas etapas. Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método de avaliação de sustentabilidade que considera os impactos ao longo de todo o ciclo de vida de um produto. A ACV segue um quadro geral em que os impactos são identificados, quantificados e interpretados, de acordo com uma proposta de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV).

Brandenburg *et al.* (2014) mostraram que existem muitas formas possíveis de modelar a tomada de decisão ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), mapas de raciocínio, Processo de Hierarquia Analítica (AHP), Processo de Rede Analítica (ANP), etc. No entanto, a ACV é a técnica mais utilizada, particularmente, porque é conveniente integrar a sua saída em modelos de otimização.

## 2.1.2 ACV de Produtos da Hortifruticultura

### Principais Estudos

Nos últimos anos, alguns autores desenvolveram pesquisas na área de ACV, que vieram a contribuir na área da gestão da sustentabilidade da cadeia de suprimentos dos produtos da hortifruticultura.

Caldeira-Piris (2002) estudaram o potencial do mercado de produtos orgânicos, com análise de viabilidade para aplicação na agricultura familiar. Mouron *et al.* (2006) realizaram uma análise de renda utilizando como indicador econômico o custo total de produção e técnicas de ACV. Fellows (2006), disse que a cada estágio da produção, é necessário aperfeiçoar os métodos usados para manusear os alimentos a fim de reduzir os custos. Backer *et al.* (2009) avaliaram a sustentabilidade ecológica da produção de alho-poró convencional e orgânica, por meio da ACV. Os resultados obtidos na produção orgânica apresentaram um perfil ambiental mais favorável. Roy *et al.* (2009) realizaram uma revisão de literatura sobre a ACV aplicada a alguns produtos alimentares. Os resultados indicaram que a produção agrícola contribui significativamente para os impactos ambientais no ciclo de vida de produtos alimentares, principalmente no que se refere às emissões de gases do efeito estufa (GEE). Lourenço e Katz (2010) analisaram os diversos índices de perdas no manuseio e transporte de verduras, legumes e frutas relacionadas à gestão logística. Esse estudo permitiu concluir que ocorrem grandes perdas de verduras e frutas, nas diversas etapas do processo de produção.

Martínez-Blanco *et al.* (2011) apresentaram inventários detalhados e abrangentes sobre a produção hortícola de tomate usando adubo e fertilizantes minerais, em campos abertos (OF) e estufas (GH), fornecendo informações sobre os impactos ambientais. Kostin *et al.* (2011), por outro lado, avaliaram um estudo de caso que envolveu a determinação do número e tipo de instalações de produção e armazenamento a ser construído em cada região do país, de modo que a demanda de produto fosse cumprida e o desempenho econômico fosse maximizado. Gunady *et al.* (2012) também fizeram uma ACV analisando os gases do efeito estufa em morangos, cogumelos e alfaces, na Costa Rica. Os resultados mostraram que as emissões para o ciclo de vida de morangos e alface foram superiores as de cogumelos, especialmente durante operações com máquinas e insumos agrícolas durante a fase de exploração.

Ingwersen (2012) realizou um estudo de ACV detalhada sobre o abacaxi, desde a fase de cultivo até a comercialização em um supermercado nos EUA. Nesse estudo, a fase da agricultura foi a fonte mais importante de impactos e, portanto, fornece mais oportunidades para melhorias. Os impactos ambientais relacionados à fase de embalagem também se apresentaram significativos. Segundo Davies *et al.* (2012), o varejo de alimentos produz uma grande quantidade de carbono, tanto diretamente, pelo uso da energia incorporada nos alimentos e pela sua embalagem plástica, como indiretamente, quando relacionada ao processo de produção. Stoessel *et al.* (2012) utilizaram a metodologia de ACV para avaliar ambientalmente 34 variedades de frutas e vegetais de um grande centro varejista suíço. O objetivo foi proporcionar apoio à decisão ambiental no setor varejista e estabelecer um Inventários de Ciclo de Vida (ICV). Os resultados foram utilizados pelo varejista para apoiar as decisões de compra e melhorar a gestão da cadeia de suprimentos.

Girgenti *et al.* (2013) analisaram as emissões de gases do efeito estufa produzidos antes, durante e após o cultivo de framboesas e mirtilos na Itália, concluindo que o uso de materiais plásticos tradicionais durante a fase de campo (viveiro e cultivo) e após a colheita (embalagem), produziram os impactos ambientais mais significativos. Khoshnevisan *et al.* (2013) fizeram um estudo de ACV do cultivo de morango, em campo aberto (OF) e em estufa (GH), no Irã, analisando dez categorias de impacto, incluindo Depleção Potencial Abiótica (DA), Acidificação Potencial (AP), Aquecimento Global (AG), Depleção do Ozônio (DO), Toxicidade Humana (TH), Ecotoxicidade da água doce e marinha (EAD e EAM), Ecotoxicidade Terrestre (ET) e Oxidação Fotoquímica Potencial (OFP). Os resultados do estudo indicaram que o sistema de produção (OF), em todas as categorias de impacto selecionadas, apresentou-se com melhor ambiente no quesito sustentabilidade, em relação ao sistema de produção do GH. Baseado nos dados de consumo de energia, gás natural e fertilizantes à base de Nitrogênio, a fase de produção do morango (GH) produziu o maior número de cargas ambientais.

Kulak *et al.* (2013) realizaram uma ACV com vistas a redução na quantidade de emissão de GEE em fazendas comunitárias urbanas, em que resultados indicaram que as maiores reduções foram alcançadas por meio de adaptações nas condições locais, buscando o consumo energético eficiente. Albrecht *et al.* (2013) estudaram os sistemas europeus mais comuns de embalagens utilizadas para o transporte de frutas e verduras, ou seja, o uso de caixas de madeira e papelão não retornáveis e grades de plástico reutilizáveis, analisando e comparando os impactos ambientais, econômicos e sociais. Os resultados mostraram que as caixas de papelão apresentam os maiores impactos ambientais em todas as categorias

avaliadas. Já a análise de custo mostrou que o sistema de grades plásticas foi o mais rentável em todo o seu ciclo de vida, uma vez que são retornáveis.

Cerutti *et al.* (2014) desenvolveram estudo sobre a produção alimentar moderna. Segundo os autores a produção é muito diversa, com altos níveis de especialização e complexidade. Esses recursos, inevitavelmente, vêm refletir sobre métodos na aplicação da ACV para produtos alimentares e agrossistemas. Theurl *et al.* (2014) analisaram a “pegada de carbono” de sistemas de produção de tomate na Áustria, Espanha e Itália, utilizando uma abordagem da ACV. A análise sugere que qualquer avaliação dos impactos climáticos totais dos produtos alimentares precisa considerar toda a cadeia de abastecimento, incluindo a produção agrícola, o transporte de distribuição e a embalagem. Robertson *et al.* (2014) avaliaram o ciclo de vida com relação à “pegada de carbono” das embalagens de kiwis produzidos na Nova Zelândia, bem como o transporte do kiwi na cadeia de suprimentos para varejistas em dois grandes mercados (Japão e Alemanha). Os resultados mostraram que a fase de distribuição contribui significativamente para a pegada de carbono de todos os produtos da cadeia de abastecimento e observou uma contribuição significativa por parte do caminhão utilizado para o transporte.

Michalský e Hooda (2015) analisaram as emissões de GEE de frutas e verduras importadas e as produzidas localmente. A abordagem foi baseada em cenários e determinou o nível de redução das emissões que poderia ser alcançado pela produção local. Soode *et al.* (2015) no estudo sobre as pegadas de carbono dos produtos hortícolas morangos, aspargos, rosas e orquídeas, na Alemanha, concluíram que a produção em estufa, no caso de morangos, rosas e cultivo de orquídeas, resulta em emissões mais elevadas do que em campo aberto.

### Análise

Levando em consideração toda cadeia produtiva de frutihortícolas, os levantamentos realizados mostraram que os impactos mais significativos estão relacionados com o uso de materiais plásticos derivados de combustíveis fósseis em todas as fases da ACV. Na fase de campo, os principais impactos em termos de energia e gases do efeito estufa estão relacionados com as operações que envolvem o uso de plásticos, como a irrigação (tubos), cobertura de estufas e canteiros. Nestes casos, é sugerida a adoção de técnicas mais sustentáveis, envolvendo a utilização de plásticos biodegradáveis como proposta de implementação de um material alternativo. Um fator negativo destes materiais está ligado às limitações de uso técnico especial pela falta de durabilidade, tornando os plásticos biodegradáveis adequados para os ciclos de produção com menor período de cultivo, como os

dos vegetais. De maneira geral, o uso de materiais plásticos para embalagens durante a fase de cultivo e após a colheita proporcionou os impactos mais significativos.

Há um grande potencial para o desenvolvimento dessa e de outras pesquisas, com vistas à avaliação dos potenciais impactos ambientais dos produtos da hortifruticultura sobre o aquecimento global através da realização de ACV. Observa-se um pequeno desenvolvimento de metodologias e programas para a divulgação provinda de organizações internacionais e locais, relacionadas ao uso da ACV com rápido acesso aos produtos agroalimentares e industriais. Estratégias para a gestão da produção de hortifrutículas, operação de equipamentos e veículos de transporte implica em impactos significativos que, incluem o uso de combustíveis alternativos ou renováveis, como biodiesel e combustível convencional. É importante se abordar os impactos da liberação de gases do efeito estufa buscando avançar para um sistema de produção de alimentos mais sustentável, com menores perdas de frutas e hortaliças e produção de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). O desejo de produção sustentável é universal, mas sua progressão e direção permanecem meio que indefinida. Neste sentido, a ACV busca desmistificar e tratar de questões relacionadas aos impactos ambientais nos mais diversos sistemas de produção. Entretanto, o resultado é fortemente influenciado pela definição dos limites do sistema, especialmente pela escolha de unidade funcional e as categorias de impacto a serem consideradas. De acordo com as fontes encontradas na literatura e trabalhos publicados, existem no setor referente a cadeia de suprimentos de frutas e verduras uma grande preocupação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Esforços são realizados em especial na comprovação de estudos com realização de coletas para obter dados agrícolas. Tais dados são utilizados para avaliar os impactos ambientais com a implementação da metodologia de ACV. O uso da ACV contribui no desenvolvimento de modelos de gestão, em especial no auxílio e consolidação do conceito de economia verde, bem como, fornecer regras de gestão robustas baseadas em conhecimentos técnicos científicos focados no desenvolvimento da agricultura sustentável. Nesse contexto, a melhor compreensão dos procedimentos ambientais utilizados na fase agrícola do ciclo de vida do produto provém da forte contribuição na produção de produtos hortifrutículas sustentáveis. Por outro lado, as ciências hortícolas vêm recebendo investimentos em pesquisa muito abaixo do desejável na comparação por setores. O fortalecimento das pesquisas em todas as fases do ciclo de vida, bem como sua divulgação, pode fornecer ao produtor informações importantes na tentativa de aumentar a renda da propriedade, sem aumento dos impactos ambientais. Atualmente, verifica-se uma maior concentração de estudos e pesquisas

de ACV na fase de cultivo de frutas e verduras, enquanto as fases de transporte e armazenamento de resíduos pouco foram estudadas.

Diferentes técnicas de ACV em conjunto com técnicas de programação matemática permitem que indivíduos e/ou empresas possam avaliar o impacto ambiental de suas decisões considerando uma diversidade de aspectos (ambientais, econômicos e sociais) ao longo de toda a cadeia de suprimento. Possibilitam assim, avaliar os impactos desde a extração de recursos naturais até o descarte final. Isso é útil para conhecer os impactos ambientais gerados durante todo o ciclo de vida de um produto, serviço ou processo. A ACV em conjunto com técnicas de programação matemática é uma poderosa ferramenta que pode modificar ou desenvolver um sistema a fim de diminuir seus impactos ambientais.

### Considerações

As literaturas sugerem que a ACV sirva como fonte de informações confiável e abrangente para a tomada de decisões ambientalmente conscientes por administradores, produtores e consumidores, ajudando na escolha de produtos sustentáveis e processos de produção mais limpos. Com efeito, embora a literatura científica sobre o tema seja recente e não seja particularmente extensa, já existem muitas maneiras diferentes de conduzir a Avaliação do Ciclo de Vida de produtos da hortifruticultura (CAMILO e RAVAGNANI, 2014).

### **2.1.3 A metodologia de ACV**

A metodologia de ACV pode incluir diferentes categorias *endpoint* e *midpoint*. No método orientado ao problema, as cargas ambientais são agregadas de acordo com a sua contribuição relativa aos impactos ambientais, e são denominados *midpoint*. O modelo *endpoint* corresponde aos impactos das intervenções ambientais para "áreas de proteção", que incluem a saúde humana, ambiente natural e ambiente modificado pelo homem, ou seja, modelo orientado aos danos. Eskandarpour *et al.* (2015) aponta três métodos comumente utilizados, o Eco-Indicator 99 (EI-99), Impact 2002+ e ReCiPe:

- ✓ O *eco-indicador 99* reúne 11 categorias de impacto em três categorias de danos (saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos).
- ✓ *IMPACT 2002+* tem 14 indicadores *midpoint* e 4 categorias de danos: saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudanças climáticas e depleção de recursos.

- ✓ *ReCiPe* tem 18 categorias em nível *midpoint* e 17 categorias em nível *endpoint* combinadas em 3 categorias de danos (saúde humana, ecossistemas, custo do excedente de recursos).

A publicação da ACV-guia CML (*Centrum Milieukunde Leiden*), marcou um avanço na base científica da metodologia de ACV. Uma inovação, de origem holandesa, foi o desenvolvimento de Eco-indicador 95 e sua versão mais recente, Eco-indicador 99, pela PRÉ-Consultants. Nesse contexto, o guia CML e o guia Eco-indicador são, atualmente, metodologias amplamente aceitas. Elas são baseadas em diferentes pontos de partida: 1) a CML utiliza uma abordagem que tem sido proposta como um “método base” para a caracterização, tendo uma abordagem *midpoint*; 2) já o Eco-Indicador 99 centra-se na interpretação dos resultados e usa a abordagem de *endpoint*. Alguns especialistas chegaram ao consenso de que era desejável ter um quadro comum em que os indicadores, tanto do *midpoint* quanto do *endpoint* possam ser usados. Esse consenso se tornou a base da metodologia ReCiPe. Esse novo método é harmônico, por que respeita os princípios de modelagem e escolhas, e também oferece resultados, tanto em nível de *midpoint*, como *endpoint* (GOEDKOOP *et al.*, 2013).

A metodologia ReCiPe leva em seu nome o acrônimo representado pelas iniciais das organizações responsáveis pelas principais contribuições em seu desenvolvimento: Revista Gestão Industrial 233 RIVM, a *Radboud University Nijmegen*, o centro de pesquisa CML da Universidade de Leiden e a empresa PRÉ Consults. Essa metodologia busca uma abordagem harmonizada em termos de princípios de modelagem e escolhas, oferecendo tanto resultados em *midpoint* como em *endpoint*, para a avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV). Consiste em uma série de métodos utilizados para converter as emissões de substâncias perigosas e extrações de recursos naturais em indicadores de categoria de impacto no nível *midpoint* (como a acidificação, as mudanças climáticas e a ecotoxicidade), enquanto que outros empregam indicadores categoria de impacto em nível *endpoint* (tais como danos à saúde humana e danos à qualidade do ecossistema).

As duas abordagens principais que envolvem a metodologia ReCiPe são: 1) o método proposto como o método para a caracterização “baseline” no Manual de ACV (Guinée, 2004), fazendo referência como a abordagem *midpoint*; 2) o método avançado no indicador Eco-99 (Goedkoop e Spriensma, 1999), fazendo referência como uma abordagem *endpoint*. O método ReCiPe é uma síntese dessas duas abordagens. A Figura 2.1 mostra uma representação do modelo proposto por Goedkoop *et al.* (2013). No caso da categoria de impacto mudanças climáticas, o indicador *midpoint* é a força radioativa infravermelha expressa em CO<sub>2</sub>

equivalente, enquanto que para o *endpoint* o indicador é representado por danos à saúde humana expressa em DALY (incapacidade de ajuste dos anos de vida) e danos à qualidade do ecossistema expresso em perda de espécies.

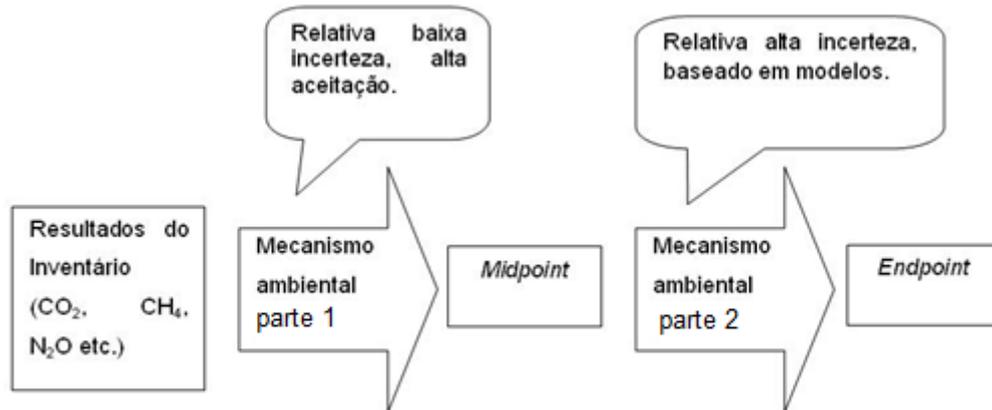


Figura 2.1 - Modelo harmônico *midpoint* – *endpoint* baseado em Goedkoop *et al.*, 2013.

Segundo o IPCC (2007) as mudanças climáticas são muitas vezes quantificadas pelo indicador de Potencial de Aquecimento Global. Essa quantificação é conseguida pelo inventário de emissões de CO<sub>2</sub> agrupado em um único indicador, expresso em CO<sub>2</sub> equivalente, durante um período predefinido, tipicamente 100 anos. Entretanto, os modelos para obtenção de fatores de caracterização são uma fonte de incertezas, uma vez que esses são modelados sobre um conhecimento incompleto e incerto dos mecanismos ambientais que estão envolvidos na mudança climática por exemplo. No ReCiPe, foi definido agrupar diferentes fontes de incertezas e diferentes opções para um número limitado de perspectivas ou cenários. De acordo com a Teoria da Cultura de Thompson *et al.* (1990) as três perspectivas são:

- ✓ individualista (I) – se baseia no interesse de curto prazo, tipos de impactos que são incontestáveis, tecnologias melhores referente a adaptação do ser humano;
- ✓ hierárquico (H) – se baseia comumente em princípios políticos relacionados a médio prazo;
- ✓ igualitário (E) – é a perspectiva da precaução, tendo em conta o maior período de tempo.

Eicker *et al.* (2010) fizeram um estudo sobre a aplicabilidade dos dados de Inventário do Ciclo de Vida não locais (Europa) para ACV local, em que os dados de inventário utilizados para a comparação foram dados brasileiros. Os dados europeus, em sua versão original, foram coletados a partir do banco de dados *ecoinvent*, que é o principal fornecedor mundial de inventário de ciclo de vida. As diferenças encontradas entre os resultados obtidos

com o ICV brasileiro e os dados europeus podem ser explicadas basicamente pelas diferenças metodológicas subjacentes aos dados. Gripp (2013) utilizou ACV para avaliar o desempenho ambiental de um sistema de produto, bem como a metodologia ReCiPe. Nesse estudo, a análise de indicador único, em *endpoint*, destacou o impacto em mudanças climáticas, relativo principalmente à queima de gás natural na caldeira para a geração de vapor, com o principal impacto ambiental associado ao ciclo de vida da água na refinaria.

Palak *et al.* (2014) fizeram um estudo e comparação das emissões de dióxido de carbono por três diferentes modais: o aeroviário, o ferroviário e por meio de hidrovias. Com base nos resultados obtidos, ficou evidente que as emissões de dióxido de carbono e gases do efeito estufa para a atmosfera variam conforme a distância entre o fornecedor e o comprador. Theurl *et al.* (2014), em seu estudo para calcular o potencial de aquecimento global relacionado com as cadeias de abastecimento de tomates, utilizaram, para o cálculo da produção, diferentes insumos dentro do limite do sistema, utilizando a base de dados *ecoinvent* v 2.0.

Soode *et al.* (2015) analisaram a “pegada de carbono” do produto, do berço ao túmulo de três produtos hortícolas em diferentes sistemas de produção na Alemanha, utilizando a base de dados do programa *ecoinvent* v 2.2. A “pegada de carbono” mede a quantidade total das emissões de gases do efeito estufa, causadas diretamente e indiretamente por uma pessoa, organização, evento ou produto. Os resultados mostram que, com relação ao transporte utilizado nas cadeias de abastecimento, as emissões de gases podem ser bastante reduzidas se forem utilizadas cargas completas dos caminhões.

#### **2.1.4 Avaliação Ambiental, Econômica e Social**

A sustentabilidade cria e mantém as condições em que os seres humanos e a natureza podem existir em harmonia produtiva, permitindo cumprir os requisitos sociais, econômicos e ambientais das gerações presentes e futuras.

Estudos voltados aos impactos ambientais, sociais e econômicos não se iniciam simplesmente coletando toda informação disponível, mas definindo previamente os objetivos do trabalho, conhecidos como abrangência e alcance, ou seja, o escopo. Para estabelecer o escopo de um estudo de impacto ambiental, procede-se primeiro à identificação das questões relevantes, com emprego de métodos como: analogia com casos similares, experiência e opinião de especialistas, consulta ao público e análise das questões definidas previamente por

via legal. Pode-se observar que a definição do escopo do estudo é tanto uma etapa do processo de AIA como uma atividade de planejamento de um estudo social e econômico.

Beanlands (1993) define *scoping* como “o processo de identificar, dentre um conjunto de potenciais problemas, certo número de questões prioritárias para serem tratadas na AIA”. O *scoping* científico estabelece os termos e as condições sob as quais os estudos podem ser efetivamente conduzidos. O *scoping* social visa identificar e compreender os valores de diferentes grupos sociais e do público geral, e qual a forma de traduzir em diretrizes para o estudo de impacto ambiental.

Na condução dos estudos e pesquisas, especialmente a AIA é uma atividade que objetiva antecipar as consequências futuras de decisões tomadas no presente, sendo a previsão de impactos uma etapa fundamental nesse processo. A previsão deve ser entendida como uma hipótese fundamentada e justificada, com possível quantificação, sobre o comportamento futuro de alguns parâmetros, denominados indicadores ambientais. É comum a confusão entre identificação e previsão de impactos. A identificação é apenas uma enumeração das prováveis consequências futuras de uma ação (SÁNCHEZ, 2013). Já a previsão dos impactos demanda de um entendimento muito detalhado das relações ecológicas, econômicas e interações sociais do que a simples identificação dos impactos.

Uma das formas de realizar previsão de impactos é a utilização de modelos matemáticos, que representam o comportamento de diferentes indicadores ambientais, sociais e econômicos em função de variáveis de entrada. Segundo Sánchez (2013), um indicador ambiental é uma variável ou estimativa ambiental que prevê uma informação agregada, sintética, sobre um fenômeno. Os indicadores econômicos são grandezas de caráter econômico, expressas em valor numérico, cuja principal utilidade consiste na aferição dos níveis de desenvolvimento de uma região ou setor. Um indicador social é uma medida estatística usada para traduzir quantitativamente uma realidade social. Os modelos que se utilizam de indicadores podem ser do tipo matemáticos (que são representações formalizadas mediante um conjunto de equações matemáticas que descrevem um determinado fenômeno da natureza).

O modelo é materializado pelo conjunto de algoritmos associados aos objetivos propostos. Nesse processo, o primeiro passo consiste em definir o conjunto de ações (alternativas) que serão avaliadas, e os critérios de avaliação, os quais, por sua vez, dependem de parâmetros (procedimentos de classificação e caracterização de impactos). Na sequência, os critérios devem ser relativizados (ponderados) e, finalmente, agregados segundo um modelo matemático pretendido (PHILIPPI JR. *et al*, 2004).

Uma vantagem do uso de modelos matemáticos são os diferentes cenários que podem ser simulados e o analista pode, assim, considerar a pior situação possível. No entanto, todas as técnicas de previsão, inclusive os modelos matemáticos, têm seus limites e produzem resultados em certa margem de incerteza. Qualquer modelagem requer que se adotem certos parâmetros (no caso, as emissões reais), o que introduz outra fonte de incertezas além daquela inerente ao modelo, por ser uma representação simplificada da realidade.

No campo da avaliação ambiental e econômica, os modelos matemáticos têm sido muito usados nos estudos da qualidade do ar. Em se tratando de poluentes atmosféricos, inicialmente são calculadas as emissões das futuras fontes. Tais emissões podem ser obtidas por meio de cálculos de balanço de massa do processo ou estimadas a partir de médias estatísticas compiladas em referências bibliográficas específicas, os chamados fatores de emissão.

Saer *et al.* (2013) fizeram uma abordagem sobre a ACV com a finalidade de identificar os processos e as etapas de um processo que têm os maiores impactos ambientais. Nesse estudo, nove categorias de impacto foram selecionadas (aquecimento global, destruição da camada de ozônio, poluição atmosférica, acidificação, eutrofização, substâncias cancerígenas e não cancerígenas, efeitos respiratórios e ecotoxicidade). Para todos os cenários analisados, o processo de produção de insumos foi o estágio com o maior impacto ambiental, especialmente para as emissões com relação à decomposição da matéria orgânica que mais contribuíram para o aquecimento global, acidificação e eutrofização.

Handler *et al.* (2014) analisaram os impactos ambientais e econômicos de diferentes opções da cadeia de abastecimento de produto em tora em Michigan nos EUA, especialmente nas fases de colheita e transporte, por meio de técnicas de ACV. Os resultados indicaram que um transporte bimodal (rodoviário e ferroviário) tem impactos ambientais menores na comparação à utilização de apenas um caminhão. A análise de sensibilidade indicou sobre uma variedade de fatores de emissão relacionados ao transporte de caminhão (distância, economia de combustível, fator de carga, capacidade de caminhão), fatores estes que influenciam para os impactos ambientais globais da cadeia de abastecimento.

Chen *et al.* (2002) propuseram orientações de projeto para controle de processos usando avaliações ambientais e econômicas, visto que, cada vez mais, há uma necessidade de se ampliar o escopo de projeto de processos, incluindo os impactos ambientais. Song *et al.* (2002) trabalharam com um problema de programação de processos de refinaria, considerando os impactos ambientais. Nesse sentido, as empresas devem fazer um esforço

para reduzir os impactos ambientais, visto que agora as pessoas têm uma compreensão muito melhor do meio ambiente.

Mele *et al.* (2011) desenvolveram um trabalho com o objetivo de apresentar uma ferramenta quantitativa para apoiar a tomada de decisões na área de projeto ideal para as cadeias de suprimentos (SC). As vantagens da abordagem apresentada foram ilustradas pelo uso de um estudo de caso, o qual buscou otimizar o desempenho econômico e ambiental da rede. Nesse trabalho o custo de transporte incluiu o combustível que foi utilizado para o transporte do produto. O uso de combustível foi determinado a partir: da distância total percorrida em uma viagem, do consumo de combustível do modo de transporte e do número viagens efetuadas em cada período de tempo. Em particular nessa pesquisa, foi mostrado como uma significativa economia ambiental pode ser alcançada ajustando as condições de operação da cadeia de suprimentos.

Raiz *et al.* (2013) analisaram o efeito da incerteza de demanda sobre o desempenho econômico e ambiental na CS. Os autores formularam um problema multiobjetivo de PLMI para maximizar o valor presente líquido (VPL) e minimizar a probabilidade de exercer um determinado limite ambiental. O desempenho ambiental foi quantificado utilizando princípios de ACV incorporados na formulação do modelo por meio de equações algébricas. O modelo foi ilustrado por meio de um estudo de caso. As soluções obtidas pela abordagem proposta, forneceram informações valiosas sobre o problema de projeto de CS sustentáveis. No entanto para o estudo apresentado, foi mostrado que a minimização do impacto ambiental esperado levou a resultados irrealistas e, portanto, não pode ser utilizado pelo tomador de decisão.

Zhang *et al.* (2014) desenvolveram um modelo para otimização de uma cadeia de suprimentos sustentável, aplicando um estudo de caso em escala real. Foi proposta uma estrutura de tomada de decisões para se tratar de problemas de planejamento, de expansão e de projeto. Três indicadores de sustentabilidade foram considerados: o custo total, as emissões de GEE e o tempo de espera. Os resultados mostraram claras trocas entre os três diferentes objetivos. Pode-se observar, também, que, normalmente, uma redução considerável das emissões de GEE pode ser alcançada com um aumento relativamente pequeno no custo, por meio do investimento em tecnologias menos poluentes. O quadro proposto pode auxiliar na tomada decisões que melhorem o desempenho da sustentabilidade da cadeia de abastecimento.

Eskandarpour *et al.* (2015) fizeram um trabalho de revisão de literatura orientada para otimização de redes de cadeia de suprimentos sustentáveis. Os autores afirmaram que os modelos e métodos de projeto de rede de CS têm sido objeto de levantamentos bibliográficos,

mas nenhum deles incluiu explicitamente o desenvolvimento sustentável como uma característica principal do problema considerado. Foram analisados 87 artigos no campo do projeto da rede da cadeia de suprimentos, abrangendo modelos matemáticos que incluem fatores econômicos, bem como dimensões ambientais e / ou sociais. Os autores concluíram que existe uma série de limitações para a pesquisa atual voltadas ao projeto de rede de CS sustentável. Nesse sentido, o alcance estreito das medidas ambientais e sociais nos modelos atuais deve ir além dos indicadores limitados de gases de efeito estufa para abordagens mais amplas do ciclo de vida, incluindo novas métricas sociais. Portanto, existe um campo amplo de pesquisa para incluir, de forma mais efetiva, a sustentabilidade em modelos de cadeias de suprimentos sustentáveis.

Zore *et al.* (2017) desenvolveram um trabalho de sínteses de redes de suprimentos sustentável com um novo critério – o lucro de sustentabilidade. Segundo os autores, a nova métrica, denominada “lucro de sustentabilidade”, é composta por indicadores econômicos, ambientais e sociais, uma vez que todos estes são expressos por termos monetários. Os diferentes critérios foram incorporados em um problema de otimização multiobjectivo. Os resultados obtidos fornecem informações sobre tecnologias sustentáveis e também indicaram que a métrica utilizada forneceu boas soluções de compromisso entre os pilares econômicos, ambientais e sociais da sustentabilidade.

Santoyo-Castelazo e Azapagic (2014) fizeram uma avaliação da sustentabilidade para sistemas energéticos integrando aspectos ambientais, econômicos e sociais. Tomando uma abordagem de ciclo de vida, o quadro proposto pelos autores integra as três dimensões de sustentabilidade para permitir avaliações tanto na tecnologia aplicadas como nos níveis de decisão dos sistemas. Esse quadro compreende a análise de cenários, a avaliação do ciclo de vida, de custos do ciclo de vida, a avaliação de sustentabilidade social e a análise de decisão multicritérios, que foram utilizadas para avaliar e identificar as opções de energia mais sustentáveis. Os resultados mostraram, com base em 17 critérios de sustentabilidade utilizados, que o cenário de negócios habituais, principalmente baseado em combustíveis fósseis, é insustentável independentemente das preferências por diferentes critérios de sustentabilidade. Isto deve-se principalmente aos altos custos e impactos ambientais associados aos combustíveis fósseis. Os autores concluíram ainda que é necessário assumir alguns compromissos entre os critérios de sustentabilidade, particularmente no que se refere aos impactos sociais.

### Considerações

Os documentos de referência encontrados não abordam num único modelo matemático de transporte de produto as três dimensões do desenvolvimento sustentável: aspectos econômicos, desempenho ambiental e responsabilidade social. Os modelos matemáticos de design de rede de CS tradicionalmente são destinados a minimizar o custo ou maximizar o valor líquido presente, com muito pouca consideração de objetivos sociais e diferentes restrições ambientais. A sustentabilidade social foi examinada em menor grau dentro gestão sustentável da cadeia de suprimentos. Além disso, a definição de sustentabilidade social ainda está em desenvolvimento.

## 2.2. PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

### 2.2.1 Programação Linear

A programação linear é, sem dúvida, o mecanismo mais adequado para a formulação de uma vasta gama de problemas com modesto esforço. Um problema de Programação Linear (PL) é um problema de otimização em que a função objetivo é linear nas e as suas restrições consistem em igualdades e inequações lineares. As formas lineares são populares porque são menos difíceis de serem definidas e o cálculo da solução mais simples para problemas lineares do que para os não-lineares (BAZARAA *et al.*, 2010).

Muitos problemas enfrentados na prática são formulados como problemas restritos. Isso ocorre porque, na maioria dos casos, problemas complexos, tais como, a política de produção detalhada de uma grande corporação, o planejamento de uma grande agência de governo, ou até mesmo a concepção de um dispositivo complexo, não pode ser tratado diretamente em sua totalidade, representando todas as possíveis escolhas, mas deve ser decomposto em subproblemas, cada subproblema com restrições separadas impostas para restringir o seu âmbito de aplicação. Assim, em um problema de planejamento, as restrições orçamentárias são comumente impostas para dissociar esse problema de forma global.

Um modelo significa um conjunto de relações matemáticas que descrevem o funcionamento dos processos unitários formando um sistema de produto (Azapagic e Clift, 1998). A forma mais comum e mais simples de modelo linear, normalmente conhecida como um modelo de entrada/saída toma a forma de um conjunto de equações lineares relativas às “saídas de” e “entradas para” um sistema econômico, por exemplo. Em ACV, este tipo de

modelo é estendido para relacionar os encargos ambientais associadas a um sistema de produto aos seus resultados econômicos.

No entanto, a abordagem simples de entrada/saída não é capaz de levar em conta a estrutura interna do sistema. A simples modelagem de entrada/saída também não se aplica à análise de um sistema de produto cuja operação é restringida, por exemplo, pela capacidade das unidades de processamento existentes, pela disponibilidade de materiais ou entradas de energia, e sujeito a restrições. Porém, a Programação Linear (PL) pode auxiliar na resolução de problemas de otimização associados a ACV, já que um modelo de PL permite resolver o problema de alocação em sistemas de função múltipla, de acordo com o procedimento recomendado pela ISO 14040 (2009).

De acordo com Azapagic e Clift (1998) o objetivo das fases de avaliação de inventário e avaliação de impacto, seria quantificar os impactos ambientais totais, e não o de otimizar o desempenho do sistema. Portanto, a otimização não é realizada a este nível de análise. O modelo de PL é resolvido para calcular os impactos em possíveis estados de funcionamento do sistema, que são normalmente definidos pelos desempenhos econômico e ambiental ótimo.

Muitos problemas na operação de uma planta industrial, projeto, localização e programação envolvem variáveis que não são contínuas, mas apresentam valores inteiros. As variáveis de decisão para determinados níveis podem ser variáveis binárias, gerando de tal forma uma dicotomia para instalar ou não uma nova peça de equipamento, por exemplo, assumindo os valores 0 ou 1. Outras variáveis inteiras podem ter números reais 0, 1, 2, 3, e assim por diante.

Pode-se classificar alguns tipos de problemas que são encontrados na otimização com variáveis discretas. O caso mais geral é a Programação Mista Inteira (PMI), um problema em que a função objetivo depende de dois conjuntos de variáveis,  $x$  e  $y$ ; em que  $x$  é um vetor de variáveis contínuas e  $y$  é um vetor de variáveis inteiras. Muitos problemas da PMI estão sujeitos à solução pelo uso de programação linear e, portanto, são chamados de Programação Linear Mista Inteira (PLMI). Nesse tipo de problema, uma ou mais variáveis de decisão devem ser inteiras. Um subconjunto comum da PLMI é o que apresenta números binários. Por exemplo, a variável binária  $x_j = 1$  (0) pode significar que é uma instalação (ou não) colocada num local  $j$ .

Os tipos de perguntas que a PL convencional ajuda a responder são, por exemplo, relacionadas a encontrar o ponto ótimo de funcionamento no sistema, que maximiza o lucro (ou minimiza os custos) e usa a quantidade ótima de recursos, sujeito às restrições. No contexto da ACV, o modelo geral da PL tem a mesma forma. No entanto, as restrições

podem englobar todas as atividades de distribuição de produto ao longo da CS. Dependendo da proposta do estudo, o sistema pode ser otimizado em mais de um objetivo (e. g., funções ambientais e econômicas) para identificar as melhores soluções para melhorias no sistema.

Azapagic e Clift (1998) foram os primeiros a propor a utilização da PL em conjunto ferramentas de ACV. A utilização dessa abordagem foi ilustrada por um exemplo específico de um sistema multiproduto que produz diferentes tipos de borato a partir de minérios de boro. O objetivo do estudo foi avaliar o desempenho ambiental do sistema e identificar as oportunidades de melhorias ambientais. Os autores puderam concluir que a PL se mostrou bastante útil no sentido de identificar oportunidades de melhorias ambientais em um sistema de produto, uma vez que as melhorias não podem ser realizadas apenas com base na ACV. A PL pode ainda ser utilizada para quantificar o compromisso entre a performance ambiental e econômica, usando a otimização multiobjetivo. Chen e Lee (2004) desenvolveram um modelo de programação da cadeia de suprimentos, construída na forma de um problema de PLMI para satisfazer vários objetivos conflitantes, considerando: a distribuição justa do lucro entre todos os participantes, os níveis de estoque de segurança e níveis máximos de atendimento ao cliente.

Guillén-Gosálbez *et al.* (2008) utilizaram técnicas de modelagem mista inteira para a otimização de processos químicos sustentáveis, nas quais a formulação matemática resultante, apontou soluções alternativas para a minimização do impacto ambiental e do custo. Grossmann e Guillén-Gosálbez (2010) analisaram as principais contribuições existentes com relação à programação matemática e gestão da cadeia de suprimentos, com destaque para as principais abordagens de otimização que estão disponíveis, incluindo o tratamento das incertezas, e utilizando a otimização multiobjetivo juntamente com objetivos econômicos e ambientais. Sabio *et al.* (2012) propuseram um novo quadro para otimizar uma cadeia de abastecimento, utilizando vários indicadores ambientais, sendo que em uma das fases do estudo foi formulado um problema de PLMI multiobjetivo que representa a minimização dos impactos mais relevantes. Vaskan *et al.* (2012) abordaram o melhor projeto de redes de suprimentos, considerando as preocupações econômicas e ambientais, cujo projeto foi apresentado por meio de um modelo matemático na forma de um problema de PLMI multiobjetivo, utilizando também princípios de ACV para quantificar os impactos ambientais.

Chang (2014) utilizou um Modelo de PLMI no planejamento da expansão do sistema de produto, visando um controle efetivo dos combustíveis fósseis causadores do efeito estufa, bem como para propor um modelo multiobjetivo útil para o planejamento da expansão do

sistema em Taiwan, onde os resultados desse estudo acenaram para viabilidade de políticas públicas de baixo consumo de energia e também de carbono. Zore *et al.* (2017) no trabalho sobre síntese de redes de suprimentos sustentáveis propõe a utilização de uma melhor versão do lucro total, que considera a sustentabilidade social.

### **2.2.2 Otimização multiobjetivo**

Na programação matemática, a preocupação é modelar os problemas e resolvê-los. Em problemas típicos de engenharia, podem ser obtidas várias, ou possivelmente infinitas soluções. Nesse sentido, em um problema de otimização deseja-se obter um projeto ótimo, maximizando ou minimizando uma função, a qual é denominada de função objetivo. Isto deve ser realizado através da determinação dos parâmetros que definem o sistema. Estes parâmetros são chamados de variáveis de projeto. Na maioria dos problemas, encontra-se restrições impostas para que o projeto seja admissível ou viável, devido às leis físicas da natureza, leis políticas, limitações de orçamento, entre outros.

A otimização é a área da pesquisa operacional que utiliza o método científico para apoiar a tomada de decisões, procurando determinar como melhor projetar e operar um sistema, usualmente sob condições que requerem a alocação de recursos escassos (FLOUDAS, 1995). Busca a melhor solução, dentre as possíveis soluções, que atenda a um ou a mais critérios estabelecidos previamente.

Sem a otimização de projetos e operações, atividades de fabricação e engenharia não seriam tão eficientes como são agora. Mesmo assim, ainda existe espaço para otimizar as atuais operações industriais, particularmente com a constante mudança econômica, energética e ambiental. A otimização de processos químicos e afins requer um modelo matemático que descreve e prediz o comportamento do processo (RANGAIAH, 2009).

Os problemas de engenharia do mundo real devem ser resolvidos de forma estratégica e otimizada de acordo com critérios pré-estabelecidos, daí a importância da aplicação da otimização multiobjetivo (OMO) para tratar objetivos conflitantes. Nesse sentido, muitos sistemas de apoio à decisão na atualidade incorporaram métodos para lidar com esses conflitos, utilizando-se teoria matemática de otimização sob múltiplos objetivos (EHRGOTT, 2005).

Até algum tempo atrás, o principal foco da otimização de processos levava em conta um objetivo de cada vez. No entanto, as aplicações práticas envolvem vários objetivos que devem ser considerados simultaneamente. Tais objetivos podem incluir o custo de

capital/investimento, custo operacional, lucro, período de retorno, qualidade e/ou recuperação do produto, a energia necessária, a eficiência, a segurança do processo e/ou complexidade, tempo de operação, entre outros (RANGAIAH, 2009).

Os objetivos adequados para uma determinada aplicação são, muitas vezes, conflitantes, o que significa que alcançar o ideal para um objetivo requer algum compromisso sobre um ou mais objetivos. Alguns exemplos de conjuntos de objetivos conflitantes são: custo de capital, custos operacionais, seletividade, conversão de qualidade, conversão do lucro, impacto ambiental, lucros e custos de segurança. Esses objetivos em conflito podem ser manipulados utilizando a combinações adequadas um determinado objetivo.

A OMO é também conhecida como otimização multicritério. Refere-se a encontrar os valores das variáveis de decisão e oferecer o melhor entre mais de um objetivo, de forma que haja muitas soluções ótimas para um determinado problema. A relevância e a importância da OMO vêm aumentando na Engenharia, movidas, em parte, pela disponibilidade de métodos novos e eficazes, bem como pelo aumento dos recursos computacionais.

Em geral, um problema multiobjetivo terá dois ou mais objetivos que envolvem muitas variáveis de decisão e restrições. Por exemplo, considera-se um problema multiobjetivo com dois objetivos:  $f_1(x)$  e  $f_2(x)$ , e diversas variáveis de decisão ( $x$ ).

Minimizar,

$$f_1(x) \text{ e } f_2(x) \quad (2.2a)$$

Sujeitas a,

$$x^L \leq x \leq x^U \quad (2.2b)$$

$$h(x) = 0 \quad (2.2c)$$

$$g(x) \leq 0. \quad (2.2d)$$

As variáveis de decisão podem ser todas contínuas dentro dos respectivos limites inferior e superior ( $x^L$  e  $x^U$ ) ou provindas da mistura de variáveis contínuas, binárias e inteiras. Em aplicações de engenharia, as restrições de igualdade,  $h(x) = 0$  podem surgir a partir de balanços de massa, energia e quantidade de momento. As restrições de desigualdade,  $g(x)$  podem ser devidas ao equipamento, material, segurança e outras considerações. Além de  $x$ ,  $f(x)$ ,  $h(x)$  e  $g(x)$ , o problema contém constantes e/ou parâmetros cujos valores são conhecidos (EHRGOTT, 2005).

Hoffmann *et al.* (2001) destacaram em seus estudos a necessidade de processos químicos integrados que levam as questões econômicas e ambientais em consideração e descreveram um método sistemático de avaliação que foi aplicado a um estudo de caso. Chen *et al.* (2004) utilizaram OMO para investigar o problema da distribuição de lucros para uma rede de cadeia de suprimentos aplicável a diversos tipos de empresas. Gebreslassie *et al.* (2009) propuseram um método sistemático baseado na otimização multiobjetivo para a concepção de processos ambientalmente conscientes. Ouattara *et al.* (2012) estudaram estratégias econômicas e ambientais para os processos de projeto, e discutiram o comportamento de vários objetivos envolvidos nos processos ecoeficientes, levando em conta, simultaneamente, aspectos ecológicos e econômicos.

### 2.2.3 Fronteira de Pareto

Dois objetivos,  $f_1(x)$  e  $f_2(x)$  são quase sempre conflitantes. Em tais situações, haverá muitas soluções ótimas para o problema multiobjetivo. Todas as soluções são igualmente boas no sentido de que cada uma delas é melhor do que as outras, em pelo menos um objetivo. Isto implica que, um dos objetivos melhora, enquanto pelo menos outro objetivo torna-se pior quando se passa de uma solução ideal para outra. As soluções de um problema multiobjetivo são conhecidas como as soluções ótimas de Pareto.

As soluções de Pareto podem ser obtidas com o uso de técnicas padrão para otimização multiobjetivo. A principal vantagem dessa abordagem é que ela oferece um conjunto de opções alternativas para o projeto do sistema, em vez de uma única solução. A partir dessas alternativas, o projetista pode escolher a melhor opção de acordo com suas preferências e da legislação aplicável.

Considere um conjunto  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  de variáveis e o problema de otimização bi-objetivo, conforme mostra as equações (2.2e) e (2.2f), com a função  $F$  definida como se segue,

$$\min F(x) = (f_1(x), f_2(x)), \quad (2.2e)$$

$$\text{s.a. } \{h(x) = 0; \quad g(x) \leq 0 \quad (2.2f)$$

Definição 1: um ponto  $x^* \in X$  é um ponto ótimo de Pareto (também conhecido como eficiente ou não dominado se e somente se não houver outro ponto  $x \in X$  tal que:  $F(x) \leq F(x^*)$ , isto é,  $f_i(x) \leq f_i(x^*)$  para  $i = 1, 2$ ;  $f_i(x) < f_i(x^*)$  para pelo menos uma função objetivo  $f_i$  (Mavrotas, 2009).

Em comparação com uma solução ótima de Pareto, qualquer outra solução não pode diminuir ainda mais o valor de uma função objetivo sem qualquer aumento em outras funções objetivo. Uma solução ótima de Pareto é aquela que não é dominada por qualquer outra solução viável. Um conjunto ótimo de soluções de Pareto é formado pelo conjunto de todas as soluções não dominadas, entre as soluções possíveis. Finalmente, a fronteira de Pareto é formada pelos pontos no espaço das funções objetivo que correspondem ao conjunto ótimo de Pareto.

Song *et al.* (2002) propuseram uma alternativa para maximizar o lucro total e minimizar os impactos ambientais. Neste caso, a melhor maneira é a obtenção de soluções ótimas de Pareto por OMO, pois traçando as soluções ótimas de Pareto, os tomadores de decisão são capazes de conhecer a correlação entre os dois objetivos. A seleção de uma das soluções ótimas de Pareto depende em grande parte dos tomadores de decisão. Gebreslassie *et al.* (2009) descrevem acerca das soluções ótimas entre as preocupações ambientais e econômicas, que podem ser definidas por um conjunto de pontos de Pareto, obtidos por meio de técnicas padronizadas para um modelo multiobjetivo. Gebreslassie *et al.* (2009) estudaram ainda a formulação de um problema multiobjetivo em estudo de caso que resolve a concepção de um sistema de produto. Nesse problema, a solução também foi definida por um conjunto de pontos de Pareto que representaram o compromisso ideal entre as preocupações ambientais e econômicas consideradas na análise.

#### **2.2.4 O método $\epsilon$ -restrição**

De acordo com Sampaio (2011) existem diversos métodos para resolver problemas envolvendo mais de um objetivo, tais métodos consistem na escalarização do problema multiobjetivo. Chamamos de escalarização a transformação de um problema de vários objetivos em um outro com apenas um objetivo.

Para se resolver um Problema de Otimização Multiobjetivo (POM), pode-se utilizar diversos métodos, entre eles, o método  $\epsilon$ -restrição. Tal método baseia-se numa escalarização, em que uma das funções objetivo é minimizada, enquanto todas as outras funções são limitadas por meio de restrições adicionais (EHRGOTT e RUZIKA, 2008). O método  $\epsilon$ -restrição pode proporcionar um subconjunto representativo das soluções de Pareto. Nesse sentido, para melhor exemplificar, de acordo com Ehrgott (2005), o seguinte problema multiobjetivo é apresentado nas Equações (2.2g) e (2.2h), de acordo com Ehrgott (2005),

maximizar

$$(f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)), \quad (2.2g)$$

sujeitas a

$$x \in S, \quad (2.2h)$$

onde  $x$  é o vetor das variáveis de decisão,  $f_1(x), \dots, f_p(x)$  são as  $p$  funções objetivo e  $S$  é a região factível.

No método  $\varepsilon$ -restrição otimiza-se uma das funções objetivo, usando as outras funções objetivo como restrições, incorporando-as na parte restrita do modelo, como mostrado na Equações (2.2i) a (2.2m),

maximizar

$$f_1(x), \quad (2.2i)$$

sujeito a

$$f_2(x) \geq e_2 \quad (2.2j)$$

$$f_3(x) \geq e_3 \quad (2.2k)$$

$$f_p(x) \geq e_p, \quad (2.2l)$$

$$x \in S. \quad (2.2m)$$

Song *et al.* (2002) utilizaram em seu trabalho um modelo de PLMI, desenvolvido para resolver o problema de programação matemática em escala real de uma indústria, onde o método  $\varepsilon$ -restrito foi utilizado, a fim de implementar a otimização multiobjetivo. Ehrgott e Ruzika (2008) fizeram um estudo e avaliação sobre uma das técnicas de escalonamento mais importantes utilizadas na programação multiobjetivo utilizando o método  $\varepsilon$ -restrição, propondo também melhorias a fim de reduzir algumas fragilidades.

### 2.2.5 Ambiente GAMS

O ambiente GAMS (Sistema Genérico de Modelagem Algébrica) é um sistema que combina a linguagem da álgebra matemática com conceitos de programação tradicionais, a fim de descrever e resolver problemas de otimização (Brooke; Kendrick; Meeraus; 1997). O GAMS contém um ambiente de desenvolvimento integrado, que está ligado a um grupo de agentes de resolução de otimização. Entre os principais *solvers* utilizados estão o Baron e o CPLEX.

O CPLEX é um *solver* GAMS que permite aos usuários combinar as capacidades de modelagem de alto nível do GAMS com o poder do *solver* CPLEX. Os otimizadores CPLEX são projetados para resolver problemas grandes e difíceis rapidamente e com a mínima intervenção do usuário. O acesso é fornecido para algoritmos de solução CPLEX para problemas de programação de números inteiros linear e misto. Um passo essencial para maior conhecimento dos métodos aplicados em PMM é fornecer códigos adequados para solucionadores que são amplamente utilizados por pessoas que atuam na área de engenharia, economia, agricultura, entre outros.

Ravagnani e Caballero (2007) apresentaram um modelo de otimização para a síntese de redes, incluindo o projeto detalhado dos equipamentos. O modelo de otimização foi desenvolvido com base nos custos da área, de energia e bombeamento, e resolvido utilizando o software GAMS. Luo *et al.* (2014) desenvolveram um problema multiobjetivo de PLMI formulado em GAMS para escolha de um produto e o método  $\epsilon$ -restrição foi aplicado para identificar o conjunto de soluções ótimas de Pareto com relação às funções objetivos citados no trabalho.

---

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA:

---

#### Aspectos metodológicos da ACV e dos modelos matemáticos

---

Neste capítulo serão apresentados os aspectos da metodologia de ACV aplicada nesse trabalho, bem como aspectos metodológicos dos modelos matemáticos multiobjetivo aqui desenvolvidos.

#### 3.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS DA ACV

De acordo com a ISO 14040 (ABNT, 2009) as fases da ACV são: definir o objetivo e o âmbito de análise; inventário dos processos envolvidos; avaliação dos impactos ambientais; interpretação dos resultados relacionados a passagem das fases representadas por inventários e finalização com avaliação final, conforme mostra a Figura 3.1a.



**Figura 3.1a** - Fases da ACV (Conforme ABNT NBR ISO 14040) (BRASIL, 2009).

O trabalho desenvolvido inclui os seguintes pontos, de acordo com a estrutura de avaliação do ciclo de vida apresentada na norma: 1) especificação das características de desempenho do processo; 2) definição das fronteiras temporais e espaciais do sistema, no qual o produto se desenvolve durante a sua vida; 3) coleta de dados necessários para a

caracterização do sistema; 4) definição das limitações do estudo; 5) estudo do Inventário do Ciclo de Vida (ICV); 6) definição do método de avaliação de impacto que se pretende usar.

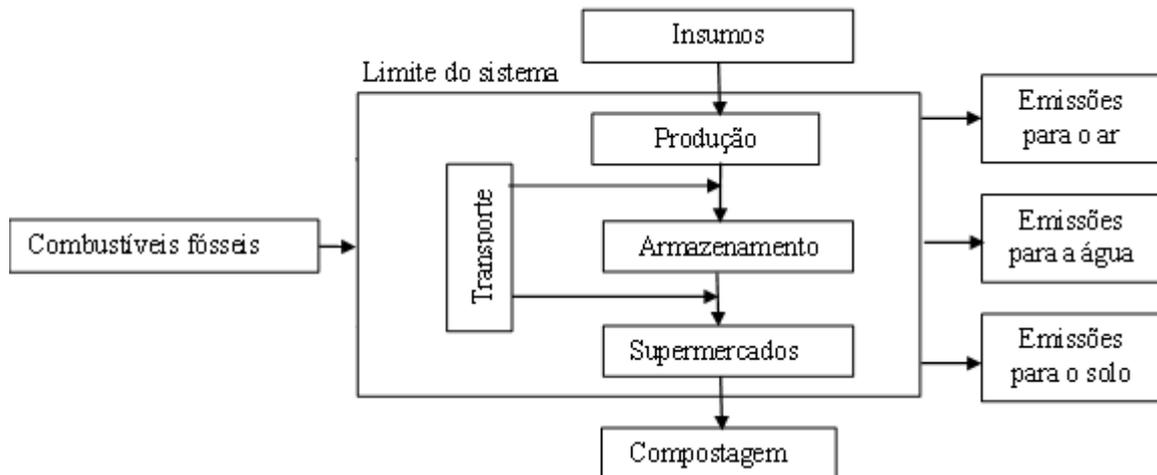
Como proposta inicial desse trabalho, foi realizada a descrição da CS estudada, para posterior formulação do modelo matemático para OMO, de acordo com algumas métricas baseadas em ACV, semelhante aos estudos desenvolvidos por Zhang *et al.* (2014). Posteriormente foi realizado o estudo de indicadores de impactos ambientais, econômicos e sociais.

### **3.1.1. Definição de objetivo e escopo**

Nesta fase, foram definidas as principais métricas da ACV a serem utilizadas, especialmente necessárias para atender o objetivo do estudo proposto. Também foram definidas as fronteiras do sistema, os métodos de alocação e os potenciais indicadores de impactos. O público-alvo desse trabalho foi especificado como pesquisadores que utilizem as técnicas de ACV para Gestão da Sustentabilidade de produtos da hortifruticultura no âmbito da cadeia de suprimentos.

A situação-alvo considerada para esse estudo de ACV foi a de apoio decisório em nível micro (Situação A), definido no Handbook de ILCD, que inclui estudos de apoio a decisão em nível micro, de produto ou de processo. Nessa situação, o ciclo de vida foi modelado com base em um mapeamento da CS efetiva, ou seja, atributivamente. Para o sistema de primeiro plano, foram usados dados primários dos pequenos produtores e de administradores de armazéns e mercados. Os dados de segundo plano foram obtidos da base de dados do *ecoinvent 3.3*.

A avaliação do ciclo de vida completa de um produto, de acordo com a NBR ISO 14040, envolve todas as etapas de um processo produtivo, desde a produção até o tratamento dos resíduos. Nesse trabalho, foram estudadas algumas etapas da CS de produtos da hortifruticultura, em especial a etapa de transporte referente a três níveis de decisão: pequenos produtores, armazéns e supermercados, conforme mostra a Figura 3.1b. As entradas de água e energia não foram consideradas para esse sistema de produto, uma vez que o foco foi dado as emissões associadas a queima de combustíveis fósseis.



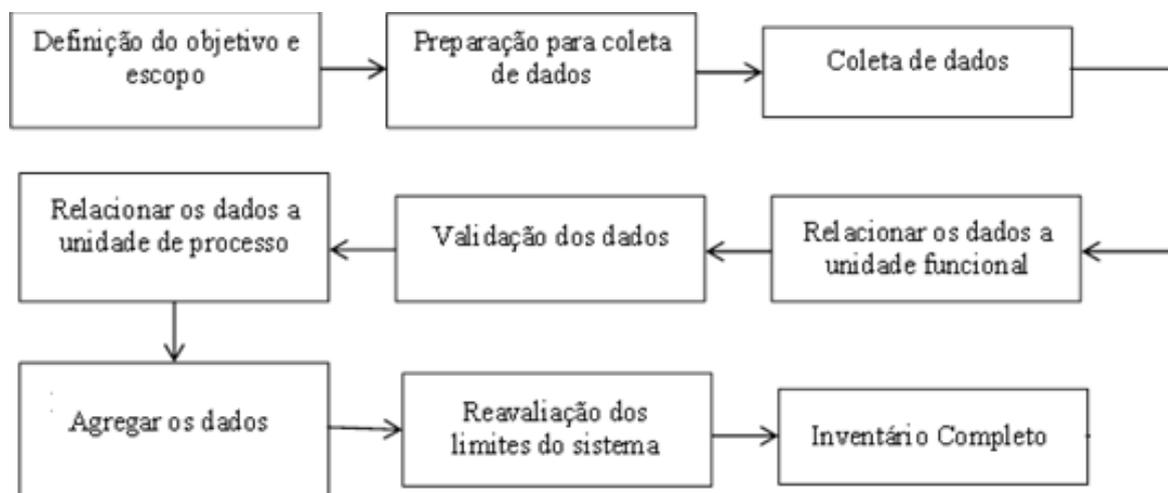
**Figura 3.1b.:** Limite do sistema de produto de frutas e verduras

Embora o modelo apresente como saídas emissões para a água e para o solo nos limites do sistema, foi dada atenção especial nesse trabalho a emissão de gases do efeito estufa para o ar. Com base no modelo do sistema de produto proposto para esse trabalho e após delimitar as suas fronteiras do sistema, deu-se início à coleta dos dados de entrada para desenvolvimento do modelo.

Outro passo importante foi a definição da unidade funcional. A unidade funcional (UF) definida para os cálculos nesse trabalho foi o transporte de 1 (um) quilograma (kg) de produto por quilometro (km).

### 3.1.2. Análise do inventário

As etapas de análise do inventário, baseadas na NBR 14044:2009, são mostradas na Figura 3.1c.



**Figura 3.1c** - Procedimentos para a análise de inventário baseado na ISO 14044 (Brasil, 2009).

Os dados do inventário para o problema foram obtidos a partir de diferentes fontes:

- entrevistas com produtores, transportadoras, nos armazéns e supermercados;
- consulta em literatura, manuais e bancos de dados;
- consulta no banco de dados *ecoinvent* versão 3.3.

Para o sistema em questão, foram feitos os balanços de massa necessários, a fim de determinar as entradas e saídas mais relevantes associadas ao processo. A ACV foi o ponto de partida utilizada como ferramenta de avaliação cíclica por atuar em todo processo produtivo. Contudo, posteriormente as análises foram concentradas em uma única etapa do processo: a etapa de transporte.

#### Subsistema de transporte

Esse subsistema englobou o deslocamento do produto, desde a colheita até o armazenamento, passagem pelo centro de distribuição e entrega no supermercado. A produção de hortifrutícolas no município de Umuarama, especialmente de tomate e a alface, foi identificada como sendo do tipo “doméstica”, ou seja, produzida na região de origem. Foram levantados no município de Umuarama os principais produtores para cada tipo de produto da hortifruticultura estudado; além disso, foram identificadas as rotas de escoamento da produção, e suas variantes como, por exemplo: capacidade de carga dos caminhões. Os produtos estudados eram transportados por vias terrestres, utilizando caminhonetes pequenas movidas a gasolina, além de caminhões de pequeno e médio porte. Dados primários de emissões de carbono foram pesquisados junto aos fabricantes de veículos. O banco de dados do *ecoinvent* também foi utilizado para coleta de dados de emissões para o estudo de alguns casos de estudo. As distâncias e rotas foram medidas utilizando os mapas disponíveis no plano diretor do município de Umuarama.

#### Subsistema de produção

Em um dos modelos desenvolvidos foi utilizado um conjunto de dados para quantificação de impactos na etapa de produção. Nesse caso o banco de dados do *ecoinvent* foi utilizado no inventário do ciclo de vida (ICV).

### **3.1.3. Avaliação de impacto**

A fase de avaliação do impacto da ACV tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados do ICV. Em geral, esse processo

envolve associar dados do inventário com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria, tentando, dessa forma, entender tais impactos. Numa segunda fase, pretende-se reduzir esta informação a um único indicador. De acordo com Ferrão (1998), nesta fase metodologia pode destacar-se seis etapas principais:

- 1) definição das categorias de impacto prioritárias;
- 2) definição de fatores de ponderação dos contributos das diversas intervenções ambientais de cada categoria de impacto ambiental;
- 3) multiplicação dos fatores de ponderação pelas intervenções ambientais, para obtenção da importância relativa de cada categoria de impacto ambiental;
- 4) normalização dos resultados obtidos por valores de referência;
- 5) definição de fatores de ponderação entre as diferentes categorias de impacto ambiental;
- 6) cálculo do indicador ambiental (ecoindicador).

Para os casos de estudo de primeiro plano os dados de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente para os modelos foram pesquisados na Associação Nacional de Veículos Automotores (ANFAVEA) para o ano de 2015.

Com relação aos casos de estudo de segundo plano dos modelos desenvolvidos nesse trabalho: para avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) os dados foram pesquisados noecoinvent 3.3., utilizando os pontos cumulativos da metodologia ReCiPe. De acordo com Eskandarpour *et al.* (2015), a pontuação fornecida pelo ReCiPe pode ser facilmente incorporada em modelos de otimização como função de objetivo ambiental.

Todos os modelos para a obtenção dos fatores de caracterização foram obtidos de Goedkoop *et al.* (2013). Este método considera 18 categorias de impactos (Tabela 3.1a) para o nível *midpoint* e 17 categorias de impacto (Tabela 3.1b) para o *endpoint*.

**Tabela 3.1a** - Categorias de impacto *Midpoint*

<b>Categorias de Impacto</b>	<b>Unidade</b>
Mudanças climáticas	kg (CO <sub>2</sub> para o ar)
Depleção da camada de ozônio	kg (CFC-11 <sup>1</sup> para o ar)
Acidificação terrestre	kg (SO <sub>2</sub> para o ar)
Eutrofização da água doce	kg (Fósforo para a água doce)
Eutrofização marinha	kg (Nitrogênio para a água doce)
Toxicidade humana	kg (1,4-DCB <sup>2</sup> para o ar urbano)
Formação de oxidante fotoquímico	kg (NMVOC <sup>3</sup> para o ar)
Formação de material particulado	kg (PM10 <sup>4</sup> para o ar)
Ecotoxicidade terrestre	kg (1,4-DCB para o solo industrial)
Ecotoxicidade de água doce	kg (1,4-DCB para água doce)
Ecotoxicidade marinha	kg (1,4-DCB para água marinha)
Radiação ionizante	kg (U235 para o ar)

Ocupação de terras agrícolas	$m^2 \times \text{ano}$ (terras agrícolas)
Ocupação de terras urbanas	$m^2 \times \text{ano}$ (terras urbanas)
Transformação de terras virgens	$m^2$ (terras virgens)
Depleção de água	$m^3$ (água)
Depleção de recursos minerais	kg (ferro)
Depleção de recursos fósseis	kg (óleo)

<sup>1</sup> CFC-11 :Fluorclorocarbono; <sup>2</sup>1,4-DCB: 1,4 diclorobenzeno; <sup>3</sup>NMVO: Compostos orgânicos voláteis não-metano; <sup>4</sup>PM10: material particulado < 10  $\mu\text{m}$

**Tabela 3.1b** - Categorias de impacto *Endpoint*

	<b>Categorias de Impacto</b>	<b>Unidade</b>
Saúde Humana	Mudanças climáticas - Saúde Humana	DALY <sup>1</sup>
	Depleção da camada de ozônio	DALY
	Toxicidade humana	DALY
	Formação de oxidante fotoquímico	DALY
	Formação de material particulado	DALY
	Radiação ionizante	DALY
Ecossistemas	Mudanças climáticas - Ecossistemas	Espécies / ano <sup>2</sup>
	Acidificação terrestre	Espécies / ano
	Eutrofização da água doce	Espécies / ano
	Ecotoxicidade terrestre	Espécies / ano
	Ecotoxicidade de água doce	Espécies / ano
	Ecotoxicidade marinha	Espécies / ano
	Ocupação de terras agrícolas	Espécies / ano
	Ocupação de terras urbanas	Espécies / ano
Transformação de terras virgens	Espécies / ano	
Recursos	Depleção de recursos minerais	\$ <sup>3</sup>
	Depleção de recursos fósseis	\$

<sup>1</sup>DALY (*disability-adjusted loss of life years*): incapacidade de ajuste dos anos de vida

<sup>2</sup>Espécies /ano: perda de espécies durante 1 ano

<sup>3</sup>\$: aumento do custo

Para metodologia ReCiPe, aplicada em alguns casos de estudo nesse trabalho, foram coletadas pontuações de saída de inventário do conjunto de dados do *ecoinvent* 3.3. Nesse caso foi utilizado o “*dataset*” hierárquico GLO EURO6: mercado para transporte – caminhões de 16-32 toneladas métricas para o transporte do produto dos armazéns até os mercados; mercado para transporte – caminhões de 3,5 a 7,5 toneladas métricas para o produto transportado dos pequenos produtores até os armazéns. Os pontos foram coletados para todas as categorias de impacto *midpoint* e *endpoint*. Em seguida foram organizados em planilha do *software Exel* de forma a ajustar os dados de acordo com o fluxo de referência (kg/ano) e unidade funcional (kg/km).

O nível *endpoint* está relacionado propriamente aos danos. Nesse sentido, existem três categorias de impacto *endpoint* relacionadas aos danos: uma ligada a área de proteção à saúde humana, outra ligada a qualidade dos ecossistemas e mais uma ligada a proteção dos recursos naturais. De acordo com Goedkoop *et al.* (2013) a maioria das categorias de impactos

*midpoint* podem ser convertidas em categorias de impacto *endpoint* por meio de fatores de caracterização.

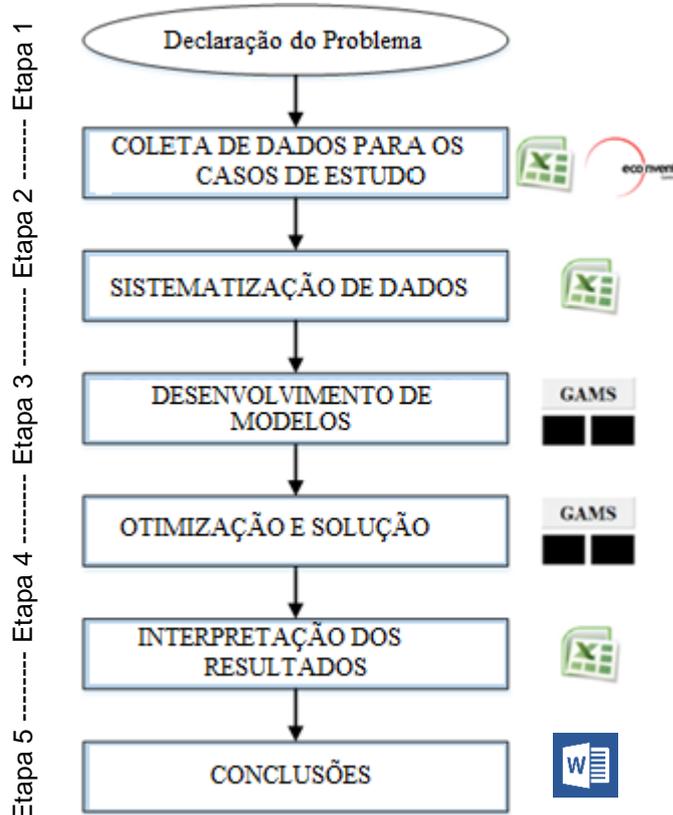
### 3.1.4. Interpretação

Neste trabalho, foi feita uma abordagem combinada que consiste em integrar ferramentas de ACV e de otimização dentro de uma estrutura de tomada de decisão única. Semelhante a estudos anteriores descritos por Luo *et al.* (2014), Ouattara *et al.* (2012) e Gebreslassie *et al.* (2009). Assim, as preferências foram articuladas na análise pós-ótima das soluções de Pareto. Esta abordagem forneceu novas perspectivas para o problema de projeto, permitindo uma melhor compreensão inerente às trocas entre os critérios ambientais, econômicos e sociais.

## 3.2. ASPECTOS METODOLÓGICOS DOS MODELOS MATEMÁTICOS

### 3.2.1 Estruturas integradas de engenharia e de negócios

A metodologia aplicada foi baseada no procedimento proposto por Quaglia *et al.* (2012), que desenvolveu um quadro integrado para síntese e redes de processamento de projeto. As etapas são adaptadas ao caso em estudo, conforme mostra o Quadro 3.2.



**Etapa 1:** declaração do problema – identificação do escopo, bem como das métricas para análise de desempenho.

**Etapa 2:** caso de estudo – todas as informações relevantes para o problema foram coletadas e organizadas em planilhas em Excel.

**Etapa 3:** modelagem e solver – foi utilizado o ambiente GAMS, para desenvolvimento de um modelo com métricas de sustentabilidade. A solução forneceu valores ótimos das variáveis de decisão ao longo da função objetivo

**Etapa 4:** resultados e discussões – com base nos resultados, as soluções identificadas são discutidas.

**Etapa 5:** conclusões – os principais resultados da otimização são descritas.

Quadro 3.2: Passos da metodologia aplicada ao caso de estudo (adaptado de Quaglia *et al.*, 2012).

### 3.2.2 Modelo de Programação Linear (PL)

Problemas de transporte, como o que se busca resolver nesse trabalho, são uma classe de problemas de Programação Linear. São modelados sobre o problema originalmente estudado por Hitchcock (1941), em que se procura minimizar o custo da entrega de quantidades integrais de mercadorias produzidas em  $n$  plantas em  $m$  saídas, balanceando o fornecimento e a demanda. Isto gera um Problemas de Transbordo sem nós intermediários e com cada fonte conectada.

De acordo com Dantzig (1963), para se resolver um Problema de Programação Linear é importante que se determine níveis para todas as atividades do sistema, de forma que: (a) não sejam negativas, (b) satisfaçam as equações do balanço de massa e (c) reduzam o custo total. O desenvolvimento de técnicas para resolver um problema da programação linear constitui o problema matemático central da programação linear. Os casos de estudo foram tratados nessa tese como uma questão de Programação Linear relacionados com o problema clássico de transporte, que foi utilizado no desenvolvimento de tecnologias de otimização.

No problema usual do transporte, são fornecidos suprimentos de várias fábricas. Além disso, são também fornecidas as demandas de vários mercados de uma determinada *commodity*, bem como o custo unitário de transporte da referida *commodity* da fábrica para os mercados em apreço. A questão é determinar o quanto se deve transportar de cada fábrica para cada mercado, de modo a minimizar o custo do transporte.

Por sua vez, o modelo que leva em consideração a avaliação objetivo ambiental  $f_2$ , aqui analisada juntamente com o objetivo econômico  $f_1$ , foi discutido inicialmente por Azapagic e Clift (1998). De acordo com esses autores um modelo convencional de Programação Linear de um sistema econômico, por exemplo, tem a forma:

Maximizar,

$$F = \sum_{i=1}^I f_i x_i \quad (3.2a)$$

Sujeito a,

$$F = \sum_{i=1}^I a_{c,i} x_i \leq e_c \quad c = 1, 2, \dots, c \quad (3.2b)$$

$$x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (3.2c)$$

A equação (3.2a) representa uma função objetivo, geralmente uma medida de desempenho econômico (por exemplo, lucro ou custo), e as equações (3.2b) e (3.2c) são as restrições lineares no sistema, descrevendo relações de balanço material e de energia, capacidade produtiva, disponibilidade de matérias-primas, os requisitos de qualidade, demanda do mercado e assim por diante. As restrições podem ser definidas como igualdades ou desigualdades.

Os tipos de perguntas que a PL convencional ajuda a responder são, por exemplo, relacionadas a encontrar o ponto ótimo de funcionamento no sistema, que maximiza o lucro (ou minimiza os custos) e usa a quantidade ótima de recursos, sujeito às restrições. No contexto da ACV, o modelo geral da PL tem a mesma forma. No entanto, as restrições (3.2b) podem englobar todas as atividades do ciclo de vida. Além do mais, as saídas funcionais também são tratadas como atividades. Além disso, as funções objetivo são agora definidas pelos danos ambientais, se a análise estiver no nível de inventário, em vez de um objetivo econômico, tal como mostra a equação (3.2d):

$$B_j = \sum_{i=1} bc_{ji} x_i \quad (3.2d)$$

$bc_{ij}$  representa o encargo  $j$  do processo ou atividade  $x_i$ . As funções objetivo também podem ser definidas como impactos ambientais, conforme mostra a equação (3.2e):

$$E_k = \sum_{j=1}^J ec_{kj} B_j \quad (3.2e)$$

$ec_{kj}$  representa a contribuição relativa dos encargos  $B_j$  ao impacto  $E_k$ , tal como definido pela abordagem orientada ao problema para avaliação de impacto. Dependendo do objetivo do estudo, o sistema pode ser otimizado em um ou em um número de funções objetivo ambientais, sociais e econômicas, a fim de identificar as melhores soluções para melhorias no sistema.

O modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLMI) com maior grau de complexidade desenvolvido nesse trabalho teve por base o modelo de otimização multiobjetivo para cadeia de suprimentos sustentável desenvolvido por Zhang *et al.* (2014), que propuseram uma estrutura que suporta decisões de planejamento da cadeia de suprimentos e permite observar as trocas entre indicadores econômicos e ambientais. Quanto ao indicador econômico utilizados nesse trabalho, foi baseado no modelo multiobjetivo para cadeias de suprimentos de combustível mais sustentável desenvolvido por Mele *et al.* (2011). Todavia, o modelo desenvolvido nessa tese vai além dos modelos biobjetivo que levam em

consideração aspectos ambientais e econômicos, foi levado em consideração um terceiro objetivo social (*triple bottom line*). O indicador social “lucro de sustentabilidade” foi utilizado com base nos estudos sobre sínteses de redes de suprimentos sustentáveis de Zore *et al.* (2017).

### 3.2.3 GAMS/CPLEX

Os modelos desenvolvidos nesse trabalho foram implementados no ambiente GAMS. O conjunto de equações foi resolvida usando o solucionador CPLEX 12.0.

O CPLEX resolveu o problema de LP usando vários algoritmos alternativos. A maioria dos problemas de LP foram resolvidos usando o algoritmo dualplex simplex do estado da arte do CPLEX.

### 3.2.4 Fronteira de Pareto

As curvas de Pareto mostram relações de troca entre ambos os objetivos. Dessa forma, aumentando uma função objetivo, a outra experimenta um declínio acentuado na primeira parte da curva e pequenas diminuições na próxima parte em que quase nenhuma melhoria adicional pode ser alcançada. Em um problema de otimização multiobjetivo, o conceito de dominância de Pareto é usado para comparar duas soluções viáveis para o problema (MAVROTAS, 2009). Considere um conjunto  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  de variáveis e o problema de otimização multi-objetivo apresentado na Eq. (3.2f).

$$\min F(x) = (f_1(x), f_2(x)), \quad \text{s. t. } \{h(x) = 0; \quad g(x) \leq 0. \quad (3.2f)$$

Em comparação com uma solução ótima de Pareto, qualquer outra solução não pode diminuir ainda mais o valor de uma função objetivo sem qualquer aumento em outras funções objetivo. A fronteira de Pareto é formada pelos pontos no espaço das funções objetivo que correspondem ao conjunto ótimo de Pareto.

### 3.2.5 O método $\varepsilon$ -restrição

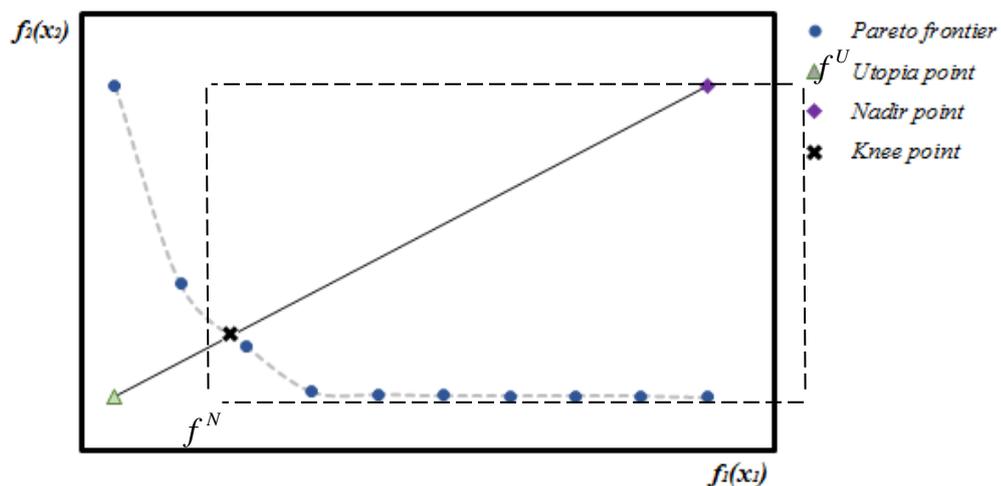
No método  $\varepsilon$ -restrição otimiza-se uma das funções objetivo usando as outras funções objetivo como restrições considerando o valor “épsilon” como o limite. Portanto, considerara-se o seguinte problema de otimização de um único objetivo (Eq. 3.2g) (Mavrotas, 2009):

$$\min f_1(x), \quad \text{s. a. } : \{f_2 \leq \varepsilon_2; \quad h(x) = 0; \quad g(x) \leq 0. \quad (3.2g)$$

Variando o valor de  $\varepsilon_2$ , se obtêm soluções eficientes para o problema. Deve ser possível converter a gama de  $f_2$  (valores objetivos) em um número finito de valores discretos (neste trabalho foram utilizados 10 pontos para formar a fronteira de pareto), a partir do valor mínimo e terminando no valor máximo.

### 3.2.6 Ponto de Joelho

A fronteira de Pareto desempenha um papel importante para análise de desempenho. A solução mais indicada para problemas multi-objetivo é o ponto mais próximo do ponto de utopia, que representa o custo ótimo e o impacto ambiental ótimo. O conjunto de valores ótimos individuais (melhor valor para cada função objetivo) representa o ponto utópico  $f^U = (f_1^*, f_2^*)$ , enquanto que o conjunto de valores máximos (pior valor para cada função objetivo) indica o ponto nadir (oposto ao ponto utópico), conforme mostra a Figura (3.2a). Analisando a fronteira de Pareto, parece que o ponto de operação mais interessante para a cadeia de suprimento pode estar em torno do chamado "ponto de joelho", que está localizado na intersecção do segmento de linha determinado pelo ponto nadir e o ponto de utopia com a fronteira de Pareto, de acordo com Deb e Gupta (2010). Neste trabalho, os pontos de joelho foram utilizados como critério para a obtenção de uma Melhor Solução Prática (MSP) para o problema de otimização multi-objetivo proposto.



**Figura 3.2a.** Pontos analisados da fronteira de Pareto com ponto de joelho  $x$ .

---

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS:

#### **Desenvolvimento de modelos para gestão da sustentabilidade**

---

Neste capítulo serão apresentados os modelos matemáticos desenvolvidos para: 4.1) avaliação de desempenho, 4.2) proposta de diferentes cenários 4.3) estudo de indicadores ambientais, 4.4) gestão da sustentabilidade da cadeia de suprimentos. Cada modelo será apresentado em cinco etapas de acordo a metodologia proposta para esse trabalho: 1) definição do problema, 2) estudo de caso, 3) modelo, 4) resultados e 5) conclusões. O produto da hortifruticultura utilizado nos três primeiros modelos foi o tomate, enquanto o último modelo foi expandido também para utilização da alface.

#### 4.1. MODELO DE PL PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ECONÔMICA DA CS DE TOMATES

##### 4.1.1 Definição do Problema (etapa 1)

A Gestão da Sustentabilidade (GS) vem crescendo com o interesse dos acadêmicos e gerentes atuantes na Cadeia de Suprimentos (SC). Especialmente no que diz respeito ao tomate, *solanum lycopersicum*, esse é um produto da hortifruticultura com participação considerável na CS no Brasil. Em 2015, a produção brasileira de tomate foi de 4.145 milhões de toneladas, em uma área de 62 mil hectares, com renda média de 66,8 quilos por hectare (IBGE, 2016).

Na etapa de transporte do ciclo de vida do produto existe preocupação com os custos de distribuição e com os impactos ambientais gerados. Uma melhoria no funcionamento da CS pode contribuir para a redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) no

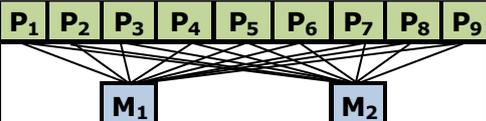
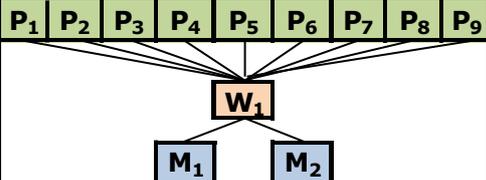
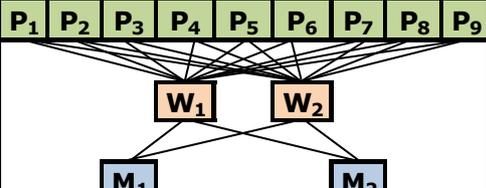
ambiente (Zhang *et al.*, 2014). Melhorias nos montantes transportados podem refletir uma grande redução de custos (Jiang e Grossmann, 2015).

Nesse trabalho, um modelo de PL foi desenvolvido para auxiliar em uma avaliação ambiental e econômica na CS de tomates, especialmente na fase de transporte, na região do município de Umuarama, no Paraná.

#### 4.1.2 Estudo de Caso (etapa 2)

Foi desenvolvida uma estrutura simplificada para o estudo de caso, escolhendo o tomate como o produto hortícola para representar o deslocamento de massa na CS. Com um número fixo de nove produtores de tomate ( $P_i$ ), considerou-se a variação na quantidade de armazéns ( $A_j$ ) (zero, um e dois armazéns) para distribuir o produto dos produtores para dois mercados ( $M_k$ ), conforme mostra o Quadro (4.1a).

Quadro (4.1a): Limites do sistema de produto de diferentes cenários para os casos de estudo.

	<p><b>Cenário 1:</b> Nenhum armazém (<math>A_j</math>) foi considerado. Os produtores enviam o produto diretamente para os mercados.</p>
	<p><b>Cenário 2:</b> Foi considerado o caso base (CB) com um armazém (<math>A_j</math>). Os produtores (<math>P_i</math>) enviam os produtos para um armazém e este abastece os mercados (<math>M_k</math>).</p>
	<p><b>Cenário 3:</b> São considerados dois armazéns (<math>M_k</math>). Os nove produtores (<math>P_i</math>) têm outra opção de dois armazéns para armazenar o produto e posteriormente enviar ao mercado.</p>

Os dados de entrada para a formulação do indicador de desempenho econômico foram os seguintes: as quantidades de tomate produzidos, armazenados e transportados; quantidade de produto exigido por armazéns e mercados; custo de distribuição dos produtores aos armazéns e dos armazéns aos mercados; as distâncias entre produtores, armazéns e mercados. Os custos foram convertidos em dólar americano com base no valor médio anual (BCB, 2015).

Os dados de entrada para a formulação do indicador de desempenho ambiental foram os seguintes: as distâncias entre os locais (fornecidos pela cooperativa de agricultores) e as formas de transporte correspondentes. Utilizou-se fatores de emissão de transporte, em kg de  $CO_2$  equivalente, especificamente indicados pelos fabricantes de pequenas pick-ups movidas a

gasolina com uma capacidade de carga de 700 kg (eficiência de 10 km/L) usadas por produtores e caminhões médios movidos a diesel com capacidade de carga de 9000 kg (eficiência de 3km/L) utilizados pelos armazéns (ANFAVEA, 2015).

### 4.1.3 Modelo (etapa 3)

Para resolver o problema de otimização multiobjetivo, o conceito de dominância de Pareto foi empregado a fim de comparar duas soluções viáveis. Considera-se um conjunto  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  de variáveis e o problema de otimização de uma função multiobjetivo  $F$ , conforme mostram as equações (4.1a) e (4.1b).

$$\min F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \quad (4.1a)$$

$$\text{subject to } \begin{cases} h(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \\ x \in X \end{cases} \quad (4.1b)$$

Um ponto  $x^* \in X$  (real positivo) é um ponto ótimo de Pareto também referido como eficiente ou não dominado) se e somente se não houver nenhum outro ponto  $x \in X$  como:

**I.**  $F(x) \leq F(x^*)$ , ou seja,  $f_i(x) \leq f_i(x^*)$  para todo  $i$  entre 1 e  $n$ ;

**II.**  $f_i(x) < f_i(x^*)$  para pelo menos uma função objetivo  $f_i$ .

As funções objetivo foram construídas a partir do modelo de transporte originalmente formulado e resolvido por Hitchcock em 1941. Por sua vez, o modelo de PL que leva em consideração a avaliação objetivo ambiental  $f_2$ , aqui analisada juntamente com o objetivo econômico  $f_1$ , foi discutido por Zhang *et al.* (2014). Incluiu-se dois blocos principais de equações: função objetivo, equação (4.1c) e as restrições, equação (4.1d), que foram obtidas após o balanço de massa na CS.

$$\min F(f_1, f_2) = \begin{cases} f_1(x_{1ij}, x_{2jk}) = \sum_{i,j} x_{1ij} cp_{ij} + \sum_{j,k} x_{2jk} ca_{jk}, \\ f_2(x_{1ij}, x_{2jk}) = \sum_{i,j} x_{1ij} tp_{ij} v_{1ij} + \sum_{j,k} x_{2jk} ta_{jk} v_{2jk} \end{cases} \quad (4.1c)$$

$$\text{sujeito a : } \begin{cases} \sum_j x_{1ij} \leq sp_i \\ \sum_i x_{1ij} \geq da_j \\ \sum_k x_{2jk} \leq sa_j \\ \sum_j x_{2jk} \geq dm_k \\ b_i \leq x_{1ij} \end{cases} \quad (4.1d)$$

$F$  é a função multiobjetivo;  $f_1$  é a função de custo mínimo [US\$];  $f_2$  é a função total de emissão de CO<sub>2</sub> [kg];  $x_{1ij}$ ,  $x_{2ij}$ , são as quantidades variáveis de tomates (kg) transportados do produtor  $p_i$  para o armazém  $A_j$  e do armazém  $A_j$  para o mercado  $M_k$ , respectivamente;  $Cp_{ij}$  e  $ca_{jk}$  são os custos (US\$/kg) associados ao transporte de  $P_i$  para  $A_j$  e de  $A_j$  para  $M_k$ , respectivamente;  $S_{pi}$  e  $d_{aj}$  são as quantidades (kg) produzidas pelo produtor  $i$  e os montantes (kg) exigidos pelo armazém  $j$ , respectivamente;  $sa_j$  e  $dm_k$  são as quantidades (kg) oferecidas pelo armazém  $j$  e os montantes (kg) exigidos pelo mercado  $k$ , respectivamente;  $tp_{ij}$  é a distância do produtor  $P_i$  para o armazém  $A_j$  [km];  $ta_{jk}$  é a distância do armazém  $A_j$  para o mercado  $M_k$  [km];  $v_{1ij}$  é a emissão de quilogramas de CO<sub>2</sub> eq. por km percorrido do produtor  $i$  ao armazém  $j$ ;  $v_{2jk}$  é a emissão de quilogramas de CO<sub>2</sub> eq. por km percorrido a partir do armazém  $j$  para o mercado  $k$  e  $bi$  é a quantidade mínima (kg) que o produtor deve entregar aos armazéns.

O modelo foi implementado em GAMS. O conjunto de equações (4.1c) e (4.1d) foi resolvido usando o *solver* CPLEX 12.1.

#### 4.1.4 Resultados (etapa 4)

Foi gerado um gráfico contendo três pontos obtidos de acordo com o procedimento proposto, conforme ilustrado na Figura 4.1. Os valores ótimos de  $f_1$  e  $f_2$  foram distribuídos no gráfico nos eixos coordenados  $x$  e  $y$ , respectivamente. Assim, foi possível avaliar a quantidade de produto que cada produtor e armazém deve transportar (kg) quando há 0, 1 e 2 armazéns, conforme demonstrado nas Tabelas (4.1a) e (4.2b), respectivamente, e os impactos ambientais e econômicos associados.

Na definição 1, os pontos  $x^*$ ,  $x^{**}$  correspondendo aos cenários 1 e 2 (os pontos estão indicados no gráfico com cor vermelha e preta) pertencem ao conjunto ótimo de Pareto para esse modelo. Ao empregar os índices acima mencionados, os pontos ótimos de Pareto para este conjunto de cenários aparecem na seguinte forma:

$$x^* = (0, x_{2jk}), \text{ com } i=1, \dots, 9 \text{ e } k=1, 2 \text{ e } x^{**} = (x_{1ij}, x_{2jk}), \text{ com } i=1, \dots, 9, j=1 \text{ e } k=1, 2.$$

A solução encontrada para o cenário 3 não pode ser desconsiderada, uma vez que ela representa um conjunto de condições relevantes para uma configuração específica da atual CS, existindo nesse cenário, portanto, um grande potencial para melhorias dos aspectos econômicos e ambientais por meio da utilização da otimização multiobjetivo.

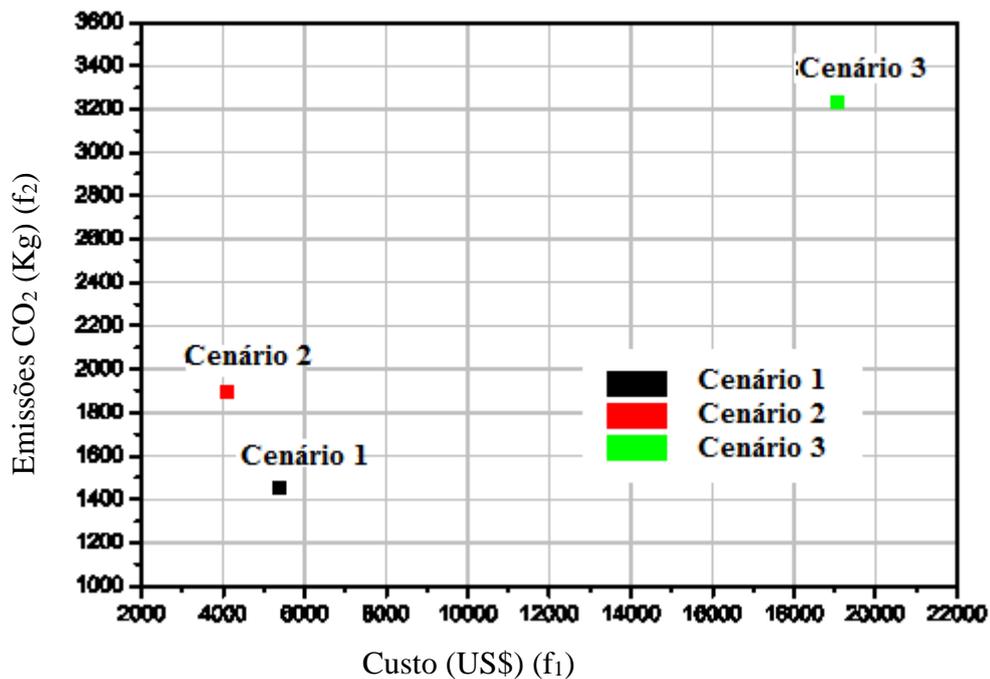


Figura 4.1: Conjunto de soluções para avaliação econômica e ambiental.

Cada ponto definido na Figura 4.1 implica uma estrutura de CS específica e um conjunto de decisões de planejamento. O benefício econômico é alcançado considerando um armazém, mas afetando o benefício ambiental, que tem um aumento de 23% em relação ao caso em que os produtores entregam os produtos diretamente ao mercado, sem usar um armazém. O cenário 2 revelou-se muito interessante do ponto de vista econômico e ambiental. Decidir sobre este cenário permitiria uma trajetória reduzida para os produtores entregarem seus produtos, o que também reduz os custos de transporte.

Tabela 4.1a: quantidades ótimas (kg) de tomate a entregar aos mercados  $M_k$  ( $k=1,2$ ).

	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
	Mercado 1	Mercado 2	Mercado 1	Mercado 2	Mercado 1	Mercado 2
Armazém 1	0,0	0,0	13440,0	10752,0	7692,0	0,0
Armazém 2	0,0	0,0	0,0	0,0	5748,0	10752,0

Tabela 4.1b: quantidades ótimas em kg de tomate a entregar por  $P_i$  ( $i=1,\dots,9$ ).

	Cenário 1		Cenário 2	Cenário 3	
	Mercado 1	Mercado 2	Armazém 1	Armazém 1	Armazém 2
Produtor 1	300	300	300	300	6884,0
Produtor 2	130	130	130	130	130
Produtor 3	4812,8	10160,8	16010,8	17440	176
Produtor 4	3,2	3,2	3,2	3,2	316,8
Produtor 5	51,0	51,0	51,0	51	5049,0
Produtor 6	25,0	25,0	25,0	25,0	2515
Produtor 7	3732,3	37,7	3770,0	3732,3	37700
Produtor 8	2425,5	24,5	2450,0	1078,3	1371,7
Produtor 9	1960,2	19,8	1980,0	1960,2	19,8

#### **4.1.5 Conclusões (etapa 5)**

A proposta de avaliação ambiental e econômica desse modelo levou ao estudo de três configurações existentes da CS, onde se aplica a variação no número de armazéns (0, 1 e 2) que recebem os produtos (kg de tomate) provenientes dos produtores. Neste contexto, o estudo da fronteira de Pareto resultou em um conjunto contendo "pontos ótimos de Pareto". Como duas das soluções ótimas são qualitativamente equivalentes, pode-se indicar que a melhor configuração de CS obtida (de acordo com a avaliação econômica e ambiental) considerou apenas um armazém. Decidir sobre o cenário com um armazém pode ser uma forma para os produtores terem menores custos de transporte, o que pode também levar a um melhor desempenho da CS com benefícios para esses produtores.

Outros estudos devem analisar cenários envolvendo maior demanda e capacidade de armazéns e mercados, bem como com melhores posições e configurações, a fim de melhorar a distribuição do produto e estabelecer condições ótimas que permitam a captura do produto emitindo menores quantidades de CO<sub>2</sub>, gerando também custos mais baixos. Uma contribuição importante desse modelo está na aplicação do quadro proposto em escala real por meio de um estudo de caso em nível de Brasil.

## 4.2. MODELO DE PL PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE DIFERENTES CENÁRIOS PROPOSTOS PARA CS DE TOMATES

### 4.2.1. Declaração do problema (etapa 1)

Na região estudada (Umuarama), os tomates são produzidos por um grupo de produtores rurais. Parte da produção é transportada para um armazém. Em seguida, esses produtos são distribuídos aos mercados de acordo com demandas específicas. Na configuração tradicional, os impactos ambientais da produção de vegetais recebem baixa prioridade e estes são geralmente incorporados como o tratamento de final de processo. Quando há negligência, eles podem muitas vezes ignorar a produção de grandes quantidades de substâncias que podem poluir o ambiente ao longo da CS.

O modelo desenvolvido propõe a minimização do custo total e a minimização do impacto ambiental total envolvido no transporte de tomate, empregando a otimização multiobjetivo no desempenho da CS, buscando soluções equilibradas. Assim, essa etapa do trabalho tem como objetivo discutir uma avaliação de desempenho de vários cenários de CS de tomate para a região do município de Umuarama. Dois aspectos do processo de distribuição foram considerados: custos de transporte entre os agricultores e o mercado final; e o impacto ambiental causado no processo de transporte.

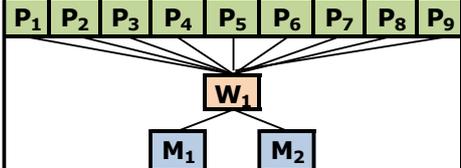
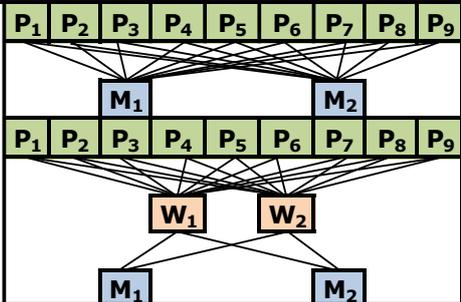
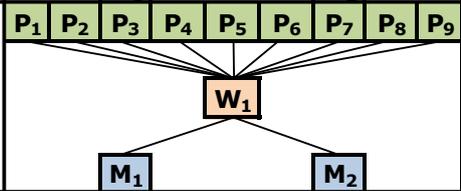
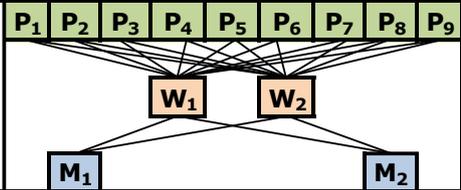
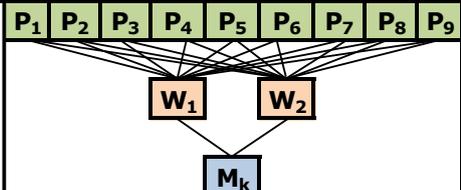
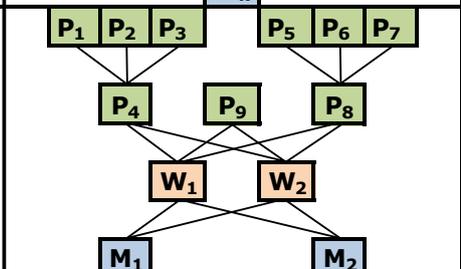
### 4.2.2. Casos de estudo (etapa 2)

Nesse trabalho, foram propostos 5 (cinco) casos de estudo. De acordo com o levantamento de campo, o caso base (CB) corresponde à cadeia de suprimentos usual adotada. Os casos 1, 2, 3 e 4 abordaram dois cenários diferentes, enquanto o caso 5 levou em conta uma nova forma de distribuição. A estrutura em três níveis de decisão foi tomada como referência: produtor (P), armazém (W) e mercado (M). Os cenários analisados são descritos no Quadro 4.2a. Em todos os casos foi considerado um número fixo de nove produtores, representados pelas siglas ( $P_1, P_2, \dots, P_9$ ). Os armazéns são representados pelas siglas ( $W_1$  e  $W_2$ ). Os mercados são representados pelas siglas ( $M_1$  e  $M_2$ ), conforme indicado no Quadro 4.2a.

Os dados de entrada para a formulação do indicador de desempenho econômico foram: as quantidades de tomates produzidas e as capacidades de armazenagem nos armazéns e mercados. Foram consideradas as quantidades produzidas para um horizonte de um ano.

Todos os dados foram obtidos junto à COOPERU (Cooperativa de Produtores de Umuarama) para as quantidades de tomate recebidas no ano de 2015. As distâncias entre produtores, armazéns e mercados são apresentadas nas Tabelas (4.2a) e (4.2b). As distâncias para todos os casos foram determinadas com a ajuda de mapas Do Plano Diretor Municipal. Devido a mudanças na localização dos armazéns para o caso 3, foram medidas novas distâncias.

**Quadro 4.2a** Limites do sistema de produto de diferentes cenários para os casos de estudo.

<p><b>CB</b></p> 	<p><b>Caso Base:</b> O caso original com um armazém foi considerado. Os produtores enviam os produtos para um armazém e este abastece os mercados. Restrições topológicas não são consideradas.</p>
<p><b>C1</b></p> 	<p><b>Cenário S1:</b> Nenhum depósito é considerado. Os produtores enviam o produto diretamente para os mercados.</p> <p><b>Cenário S2:</b> São considerados dois armazéns. Os produtores têm outra opção de armazém para armazenar o produto.</p>
<p><b>C2</b></p> 	<p><b>Cenários S1 e S2:</b> a capacidade do armazém aumenta 44% e 82% respectivamente, em relação ao CS. Estes valores foram ajustados de acordo com a possibilidade de expansão do sistema.</p>
<p><b>C3</b></p> 	<p><b>Cenários S1 e S2:</b> a localização dos armazéns foram modificadas para reduzir as distâncias entre produtores, armazéns e mercados. Os novos locais foram determinados com base no plano diretor.</p>
<p><b>C4</b></p> 	<p><b>Cenários S1 e S2:</b> considera-se apenas um mercado (<math>M_k</math>, para <math>k = 1,2</math>) comparando a performance do sistema quando os armazéns enviam seu produto diretamente para um mercado específico.</p>
<p><b>C5</b></p> 	<p>Foi proposta uma nova configuração de distribuição onde os produtores (<math>P_1, P_2, P_3, P_5, P_6</math> e <math>P_7</math>) enviam seus produtos a outros produtores que colaboram (<math>P_4</math> e <math>P_8</math>), no transporte dos produtos para os armazéns. Por uma questão de logística apenas <math>P_9</math> teria que levar o seu produto para o armazém.</p>

**Tabela (4.2a)** Distâncias [km] entre armazéns e produtores.

Casos	Armazéns	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>
CB,1,2,4	W <sub>1</sub>	31,00	35,90	18,90	30,10	19,10	29,86	15,77	15,80	10,23
CB,1,2,4	W <sub>2</sub>	24,00	28,10	17,20	23,10	17,30	22,80	14,20	14,00	8,90
3	W <sub>1</sub>	24,20	29,00	15,20	23,70	15,30	22,90	13,20	13,10	10,40
3	W <sub>2</sub>	12,70	17,50	27,60	12,10	27,70	11,40	25,80	25,70	22,20

Para o Caso 5, as distâncias percorridas foram adequadas ao caso, como mostrado na Figura 4.1, onde P<sub>4</sub> e P<sub>8</sub> representam pontos de transbordo.

**Tabela 4.2b** Distâncias [km] entre armazéns e mercados.

Casos	Armazéns	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
CB,1,2,4,5	W <sub>1</sub>	4,80	7,50	2,50	3,70
3	W <sub>2</sub>	5,10	0,90	17,0	13,7

As quantidades de produto exigidas pelos armazéns e mercados são descritas na Tabela (4.2c). As capacidades de armazenamento para os casos são apresentadas na Tabela (4.2d). Os custos de distribuição dos produtores aos armazéns e depois aos mercados são apresentados na Tabela (4.2e). O custo de aquisição de matérias-primas para a produção de tomate não foi considerado nessa otimização. Os custos foram dados em dólar americano com base no valor médio anual (BCB, 2015).

**Tabela 4.2c** Demanda total dos armazéns e mercados

Armazéns	Demanda (kg)	Mercados	Demanda (kg)
W <sub>1</sub>	16480	M <sub>1</sub>	13440
W <sub>2</sub>	8240	M <sub>2</sub>	10752

**Tabela 4.2d** Capacidades de armazenamento dos casos.

Armazéns	Caso base [kg]	Caso 2 – Cenário 1 [kg]	Case 2 – Cenário 2 [kg]
W <sub>1</sub>	24720,0	35729,0	45000,0
W <sub>2</sub>	16500,0	25500,0	35000,0

**Tabela 4.2e** Custo da distribuição dos produtores para os armazéns e depois para os mercados (US\$ / kg).

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
W <sub>1</sub>	0,011	0,030	0,012	1,041	0,041	0,130	0,046	0,071	0,057	0,004	0,009
W <sub>2</sub>	0,009	0,023	0,011	0,799	0,038	0,099	0,042	0,063	0,050	0,006	0,008

Para formular o indicador de desempenho ambiental, os dados de entrada foram as emissões de quilogramas de CO<sub>2</sub> eq. por quilômetro dirigido do produtor para o armazém e do

armazém para o mercado. Os fatores de emissão do transporte foram especificados pelos fabricantes de pequenas pick-ups a gasolina com 700 kg de capacidade de carga (10 km/l de eficiência) usados pelos produtores e caminhões médios movidos a diesel com capacidade de carga de 9.000 kg (3 km/L de eficiência), utilizados pelos armazéns (ANFAVEA, 2015).

### 4.2.3 Modelo (etapa 3)

Um modelo de Programação Linear (LP) foi proposto, baseado no modelo de transporte desenvolvido por Zhang *et al.* (2014). O estudo de ACV aplicado neste trabalho foi realizado de acordo com a norma ISO 14044/2009. As funções objetivo do modelo descrevem aspectos econômicos e ambientais. O modelo é composto por dois blocos principais de equações: função objetivo (Eq. 4.2a) e as restrições (Eq. 4.2b), obtidas após o balanço de massa do CS:

$$\min F(f_1, f_2) = \left( f_1(x_{1ij}, x_{2jk}), f_2(x_{1ij}, x_{2jk}) \right) = \left( \sum_{i,j} x_{1ij} cp_{ij} + \sum_{j,k} x_{2jk} ca_{jk}, \sum_{i,j} x_{1ij} tp_{ij} v_{1ij} + \sum_{j,k} x_{2jk} tw_{jk} v_{2jk} \right) \quad (4.2a)$$

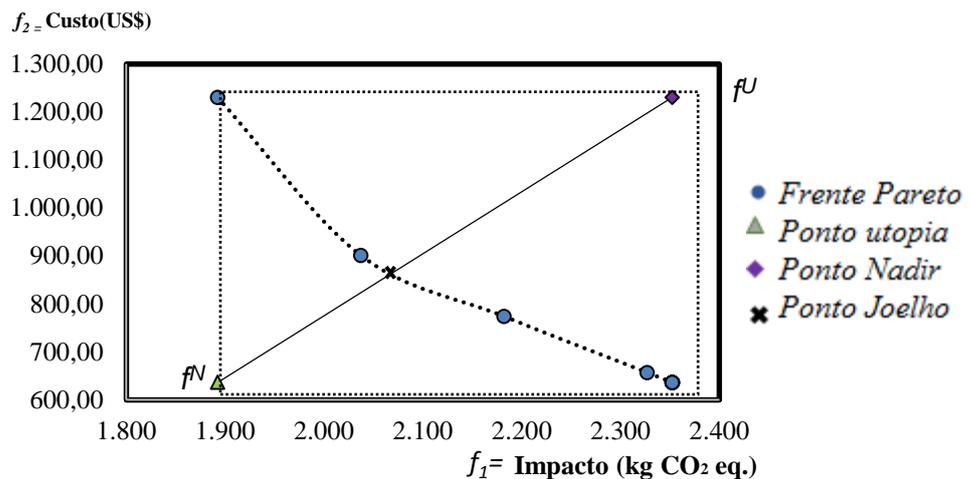
$$\text{s.a.:} \left\{ \sum_j x_{1ij} \leq sp_i, \sum_k x_{2jk} \leq sa_j, b_i \leq x_{1ij}, \sum_i x_{1ij} \geq da_j, \sum_j x_{2jk} \geq dm_k \right. \quad (4.2b)$$

$x_{1ij}$  e  $x_{2jk}$  são variáveis que representam as quantidades de tomates (kg) transportadas do produtor  $i$  até o armazém  $j$  e do armazém  $j$  até o mercado  $k$ , respectivamente. As variáveis  $cp_{ij}$  e  $ca_{jk}$  representam o custo de transporte (US\$/kg) do produtor  $i$  para o armazém  $j$  e do armazém  $j$  para o mercado  $k$ , respectivamente. As variáveis  $tp_{ij}$  representam as distâncias do produtor  $i$  até o armazém  $j$  (km) e  $tw_{jk}$  representa a distância do armazém  $j$  para o mercado  $k$  (km). As variáveis  $sp_i$  e  $da_j$  são as quantidades (kg) oferecidas pelo produtor  $i$  (kg) e requeridas pelo armazém  $j$ . As variáveis  $sa_j$  e  $dm_k$  são as quantidades (kg) oferecidas pelo armazém  $j$  e requeridas pelo mercado  $k$ . Finalmente,  $b_i$  é a quantidade mínima (kg) que o produtor deve entregar ao armazém, estipulada em 10% do total produzido.

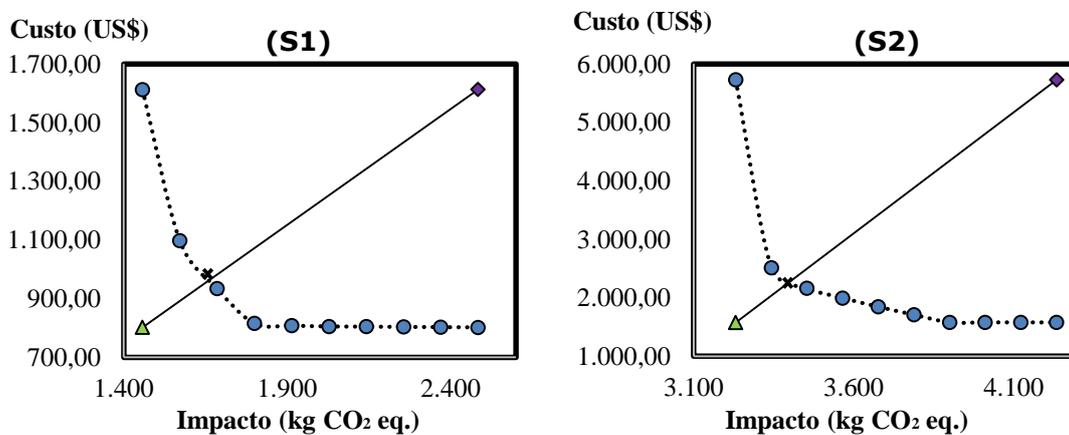
Em seguida, o modelo foi implementado em GAMS. O conjunto de equações (4.2a) e (4.2b) foi resolvido usando o solver CPLEX 12.1. O método  $\epsilon$ -restrição foi utilizado para otimização multiobjetivo. O conceito de dominância de Pareto foi aplicado a fim de revelar as possíveis trocas entre os dois objetivos, de acordo com Mavrotas (2009). A identificação das melhores soluções praticáveis (MSP) pontos para CS se deu por meio da identificação do chamado "ponto de joelho", de acordo com Deb e Gupta (2010).

#### 4.2.4 Resultados (etapa 4)

Os resultados de otimização foram analisados para os seguintes casos: caso base, conforme ilustrado na Figura 4.2a; Casos 1, 2, 3, 4 e 5, conforme ilustrado nas figuras 4.2b, 4.2c, 4.2d, 4.2e, 4.2f, 4.2g e 4.2h, respectivamente. Para todos os casos, dependendo da posição na curva de Pareto, diferentes soluções ótimas podem ser obtidas e podem representar a MSP para esse estado particular da CS. A fronteira de Pareto para  $f_1$  e  $f_2$  obtida foi traçada nos eixos  $x$  e  $y$  para cada caso, respectivamente. Assim, por exemplo, para cada caso, a fronteira de Pareto foi obtida por otimização de uma função objetivo (custo) e subdivisão do domínio da outra função objetivo (impacto ambiental) em 10 subintervalos e deixando-a como restrição. Todas as curvas têm formas semelhantes. A Figura (4.2a) ilustra os pontos discutidos anteriormente. O ponto "x" na figura representa o "ponto do joelho", um ponto de equilíbrio entre a função de custo objetivo e a função de impacto ambiental.

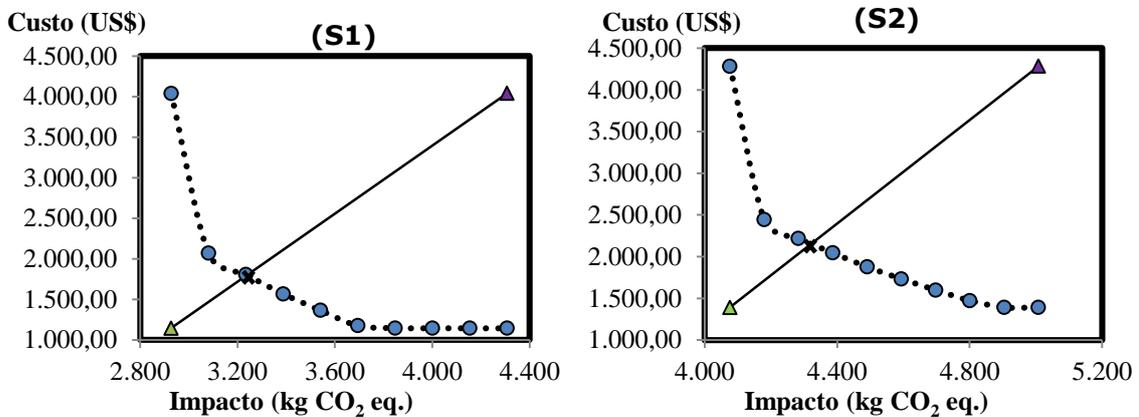


**Figura 4.2a** CB – Configuração original com um armazém.

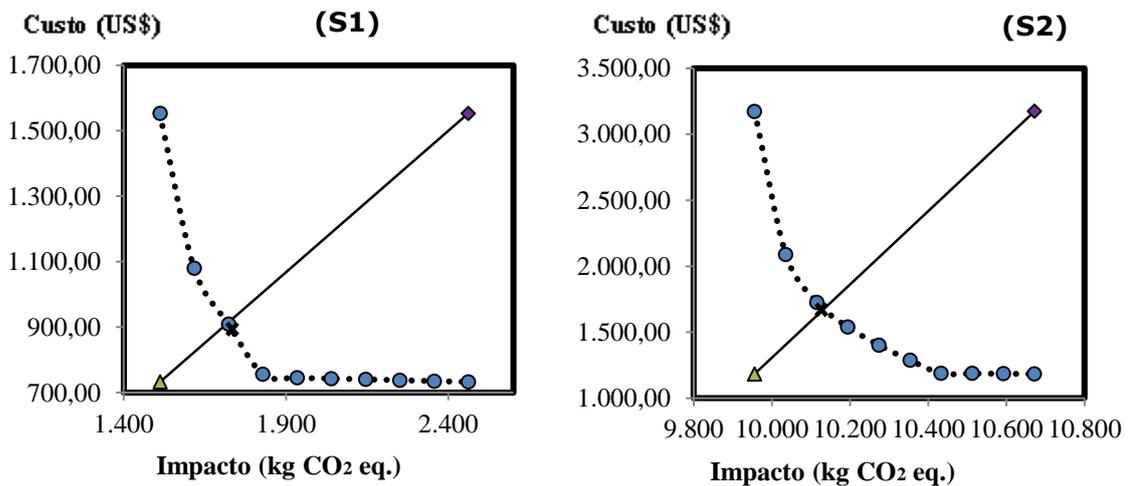


**Figura 4.2b.** Caso 1 – Cenário 1 (S1) e Cenário 2 (S2).

A Figura 4.2b apresenta um conjunto de soluções de Pareto para o CB. Entre todos os pontos mostrados na curva, a solução mais próxima do "ponto do joelho" ( $f_1 = 2.037,27$  eq. CO<sub>2</sub> e  $f_2 = \text{US\$ } 900,73$ ) representa uma possível solução ótima para o caso, o que minimiza as funções objetivo. Analisando o Caso 1 (S1) verifica-se que a produção de CO<sub>2</sub> eq. diminui aproximadamente 17% em relação ao CB, isso porque os produtores encaminham seu produto diretamente por caminhos mais curtos, economizando combustível e liberando menos GEE vindos dos veículos. Por outro lado, quando a quantidade de armazéns é aumentada, há um aumento significativo no custo total e também nas emissões de CO<sub>2</sub> equivalente. Se compararmos o caso 1 (S2) com o CB, o custo foi 42% acima do possível valor ótimo. Além disso, verificamos que a produção de CO<sub>2</sub> eq. foi aproximadamente 62% maior.



**Figura 4.2c:** Caso 2 - Cenários com diferentes capacidades (44% em (S1) e 82% em (S2)).



**Figura 4.2d.** Caso 3 - Cenários S1 e S2 com diferentes distâncias dos armazéns.

As Figuras (4.2c) e (4.2d) apresentam um conjunto de soluções de Pareto para os casos 2 e 3. Esses casos foram projetados para avaliar o comportamento do custo de distribuição e os impactos ambientais quanto a alterações nas capacidades de armazenamento da CS e na localização dos armazéns. No caso 3, a potencial solução ideal está próxima ao ponto do joelho, tanto para os cenários, S1 ( $f_1 = 3233,46$  CO<sub>2</sub> eq. e  $f_2 = \text{US\$ } 1806,75$ ) e S2 ( $f_1 =$

4283,43,41 CO<sub>2</sub> eq. e  $f_2 = \text{US\$ } 2217,83$ ). Assim, um aumento acentuado de 82% na capacidade do armazém implica um aumento de cerca de 30% no impacto ambiental e cerca de 17% no custo.

Os resultados apresentados na Figura 4.2d (caso 3) refletem a importância das decisões de projeto para um sistema de produtos: um armazém com boa localização tende a minimizar os custos de distribuição e os impactos ambientais, poupando insumos e reduzindo as distâncias percorridas, implicando em redução das emissões de GEE. Um armazém com má localização tende a aumentar os custos de distribuição em aproximadamente 54% (S2), enquanto os impactos ambientais também aumentaram significativamente. A mesma análise pode ser realizada nos outros pontos sob a curva traçada, que são todos ótimos, no sentido de Pareto. Os tomadores de decisão podem selecionar qualquer solução no gráfico, dependendo de quanto um objetivo será alcançado em comparação com outro.

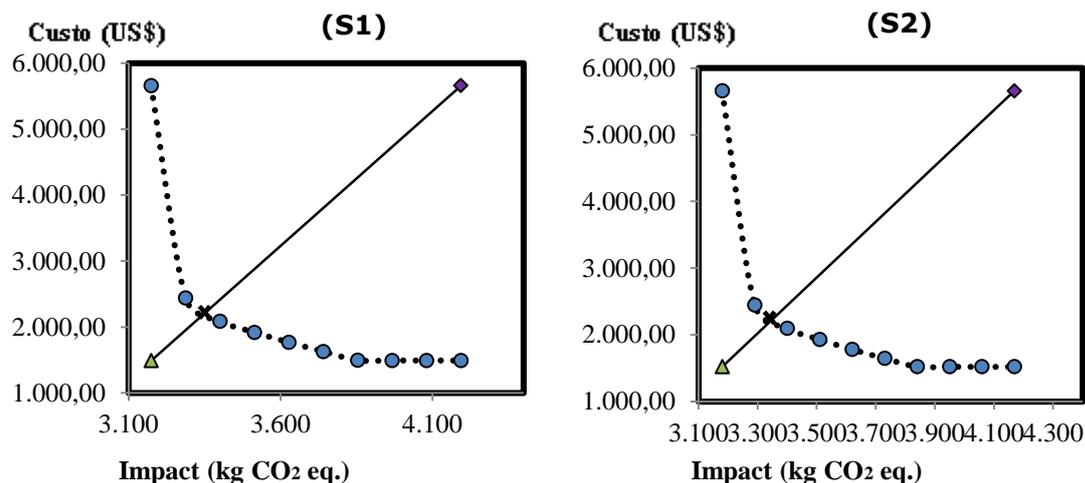
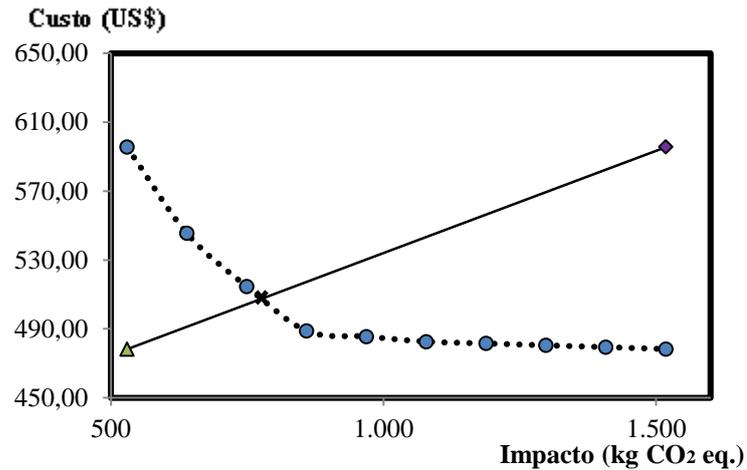


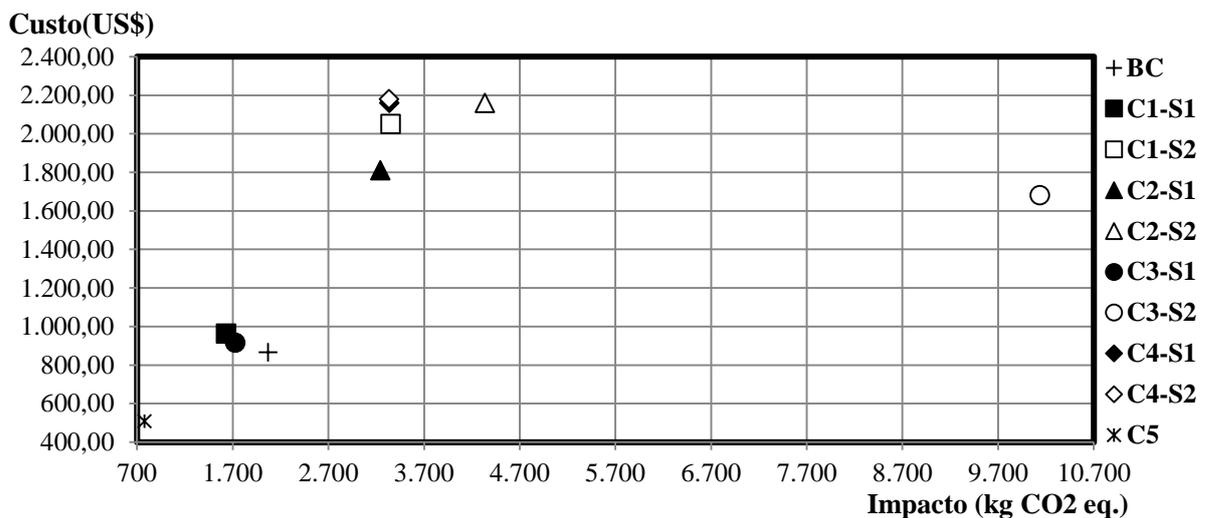
Figura 4.2e: Caso 4 - Mercados isolados: M1 em (S1) e M2 em (S2).

A Figura (4.2e) apresenta um conjunto de soluções de Pareto para o caso 4, onde os armazéns têm a opção de enviar seu produto para apenas um dos dois mercados. A Figura (4.2e) mostra uma diminuição de aproximadamente 3,2% na emissão de CO<sub>2</sub> e de 0,5% no custo, ao comparar M2 (S2) com M1 (S1). Esta redução de custo e impacto deve-se ao posicionamento do M1, que está relativamente mais próximo dos armazéns, o que implica em menores emissões de GEE e menores custos.



**Figura 4.2f:** Caso 5 – Nova configuração de distribuição

A Figura (4.2f) mostra a fronteira de Pareto para o caso 5. Nesse caso, foram criados dois pontos de transbordo nas rotas entre produtores e armazéns, com uma diminuição efetiva nas distâncias percorridas dos produtores para os armazéns. Neste caso, a capacidade de carga dos caminhões foi suficiente para assegurar o transporte da produção armazenada nos pontos de transbordo. Nessa configuração, os custos e emissões de CO<sub>2</sub> eq. diminuem acentuadamente em relação às configurações de CS verificadas em todos os casos anteriores. Por exemplo, se compararmos o caso 5 com o Caso 1 (S2), é possível notar uma redução de aproximadamente 23% para impactos e 24% para custos. Assim, com a criação de pontos de transbordo, foi possível constatar que há grandes possibilidades de melhorias na gestão de CS.



**Figura 4.2g:** Pontos joelho de todos os casos e cenários.

Com o objetivo de realizar uma melhor comparação entre os casos, os "pontos de joelho" foram apresentados em um único gráfico, como mostrado na Figura 4.2g. Pode-se observar que o caso 5 realmente apresenta uma CS que minimiza  $f_1$  e  $f_2$  de forma efetiva, sendo possível indica-la ao decidir sobre novas estratégias, como, por exemplo, a criação de

outros pontos de transbordo para obter melhorias na CS considerada. Por outro lado, comparando a fronteira de Pareto obtida para o CB com as obtidas nos outros casos, o CB pode ser considerado como uma alternativa satisfatória. No entanto, os produtores rurais devem dar atenção especial a criação de pontos de transbordo, a fim de reduzir as distâncias percorridas e o custo de transporte do produto. Em geral, se todas as soluções de Pareto forem consideradas de igual importância, é possível escolher a melhor solução aplicável (MSP) para cada caso de estudo através da análise do ponto de joelho. Portanto, o valor da otimização multiobjetivo no contexto da ACV baseia-se em oferecer uma gama de escolhas para melhorias ambientais e econômicas em um sistema, permitindo que as preferências sejam identificadas após a análise de todos os intercâmbios entre os objetivos estudados.

#### **4.2.5. Conclusões (etapa 5)**

Para todos os casos analisados, podem ser obtidas diferentes soluções ótimas que podem representar a MSP para esse estado particular de operação da CS. Do mesmo modo, quando olhamos para um ponto diferente na curva, a MSP também pode mudar. Comparando o ponto de joelho da fronteira de Pareto obtido no CB com os pontos de joelho obtidos para os outros casos, pode-se concluir que a configuração com um armazém é uma alternativa minimamente satisfatória, uma vez que a CS em operação consegue atender as demandas por produtos de armazéns e mercados. No entanto, deve ser dada especial atenção aos produtores rurais, a fim de reduzir as distâncias e os custos de transporte para todos os cooperados. É importante destacar que o caso 5 desse trabalho apresenta uma CS que minimiza  $f_1$  e  $f_2$  e pode indicar ao tomador de decisão novas estratégias, como a criação de pontos de transbordo para obter melhorias na CS considerada. De acordo com isso, foi possível concluir que existem grandes possibilidades de melhorias para gestão sustentável da CS de tomates, uma vez que mudanças na configuração do processo podem se traduzir em minimização de custos e também de impactos ambientais. Vale lembrar que as melhores opções praticáveis para a gestão da CS dependerão do conhecimento do tomador de decisão e de análise apropriada. O modelo de desempenho aqui apresentado pode se traduzir em melhorias no processo de distribuição de frutas e produtos hortícolas, trazendo benefícios econômicos e ambientais para agricultores, armazéns e administradores de supermercados.

### 4.3. MODELO DE PL PARA OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DA CS DE TOMATES UTILIZANDO DIFERENTES INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL

#### 4.3.1 Definição do problema (etapa 1)

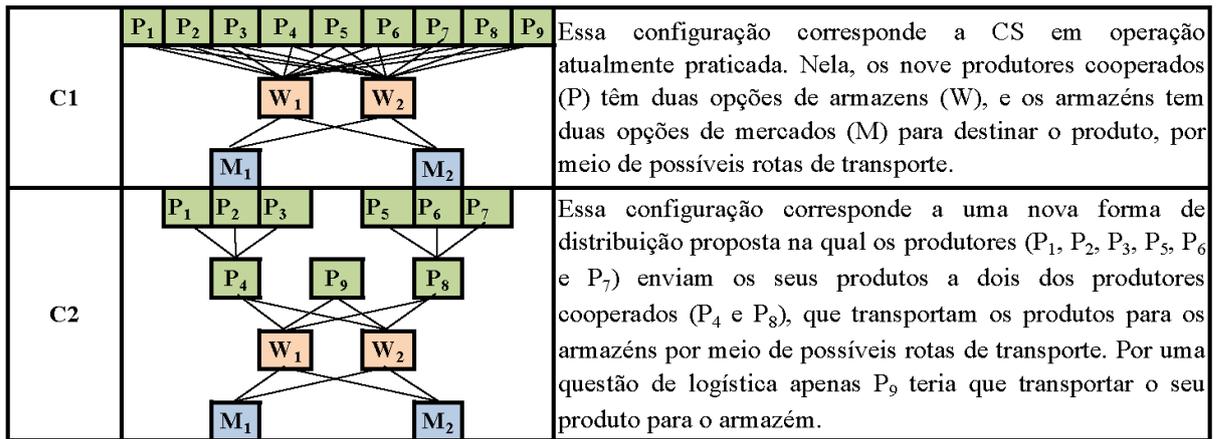
No atual momento, ocorre um esforço significativo de investigação que é intensificado e dedicado a ampliar os limites de análise para capturar um conjunto de práticas de negócios que levem em consideração questões de grande relevância, como é o caso dos impactos ambientais. Essa tendência busca motivação especialmente pela oportunidade de obter maiores benefícios econômicos por meio da gestão integrada de toda a cadeia de suprimentos, contribuindo para os avanços na área de controle e desenvolvimento de processos.

Nesse contexto, modernas ferramentas de apoio para avaliação de impactos ambientais e otimização de processos ainda são pouco utilizadas, especialmente no Brasil. De maneira análoga, o correto transporte de produtos desde os fornecedores, ao longo do processo de produção e durante a distribuição até o consumidor, é essencial para diminuir o impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida. Assim, é relevante se pensar em formas de minimizar os impactos negativos da etapa de transporte na cadeia de suprimentos, buscando melhorias para o sistema de distribuição de produtos da hortifruticultura no varejo e benefícios para a sociedade.

Consoante a isso, o problema de projeto de CS abordado neste trabalho visa determinar uma configuração para transporte de tomates na CS com mínimos impactos ambientais e mínimo custo possível, utilizando diferentes indicadores ambientais para avaliação de desempenho da rede.

#### 4.3.2 Caso de estudo (etapa 2)

A estrutura de três escalões da CS foi tomada como referência, conforme mostra o Quadro 4.3a. A rede inclui os seguintes elementos: um conjunto de 9 (nove) produtores (P) de onde partem os produtos; um conjunto de 2 (dois) armazéns (W) onde os produtos são armazenados antes de serem enviados para os mercados; e um conjunto de 2 (dois) mercados (M) onde os produtos estão disponíveis para os clientes. As decisões a serem tomadas incluem a otimização sustentável da CS atualmente em operação, a otimização sustentável da nova CS proposta e a avaliação de desempenho utilizando diferentes indicadores ambientais.



Quadro 4.3a: estrutura da CS que liga produtores, armazéns e supermercados.

Os dados de entrada para a formulação do indicador de desempenho econômico foram: as quantidades de tomates produzidas e as capacidades de armazenagem nos armazéns e mercados, conforme mostra a Tabela 4.3a. Todos os dados foram obtidos junto à Cooperativa de Produtores de Umuarama (COOPERU) para as quantidades de tomate recebidas no ano de 2015. As distâncias entre produtores, armazéns e mercados são apresentadas nas Tabelas 4.3a e Tabela 4.3b. As distâncias foram determinadas com a ajuda de mapas do Plano Diretor Municipal.

**Tabela 4.3a** Capacidade de armazenamento dos casos.

Armazém	Quantidade[kg]
W <sub>1</sub>	24720,0
W <sub>2</sub>	16500,0

**Tabela 4.3b.** Distâncias [km] entre armazéns (W) e produtores (P).

Casos	Armazéns	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>
1	W <sub>1</sub>	31,00	35,90	18,90	30,10	19,10	29,86	15,77	15,80	10,23
1	W <sub>2</sub>	24,00	28,10	17,20	23,10	17,30	22,80	14,20	14,00	8,90

Para o Caso 2, as distâncias percorridas foram adequadas de acordo com a nova configuração proposta, conforme mostra o Quadro Figura 4.3a, onde P<sub>4</sub> e P<sub>8</sub> representam pontos de transbordo.

**Table 4.3c** Distâncias [km] entre armazéns (W) e mercados (M).

	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
W <sub>1</sub>	4,80	7,50
W <sub>2</sub>	2,50	3,70

As quantidades de produto exigidas pelos armazéns e mercados são descritas na Tabela (4.3d) e os custos de distribuição dos produtores aos armazéns e depois aos mercados

são mostrados na Tabela 4.3e. O custo de aquisição de matérias-primas para a produção de tomate não é considerado na otimização. Na Tabela (4.3e) são apresentados os custos de distribuição foram dados em dólar americano com base nesse valor médio anual (BCB, 2015).

**Tabela (4.3d)** Demanda total dos armazéns e mercados.

Armazéns	Demandas (kg)	Mercados	Demandas (kg)
W <sub>1</sub>	16480	M <sub>1</sub>	13440
W <sub>2</sub>	8240	M <sub>2</sub>	10752

**Tabela (4.3e).** Custo da distribuição dos produtores para os armazéns e depois para os mercados (US\$/kg).

Armazéns	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>9</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
W <sub>1</sub>	0,01	0,03	0,01	1,04	0,04	0,13	0,04	0,07	0,05	0,004	0,009
W <sub>2</sub>	0,00	0,02	0,01	0,79	0,03	0,09	0,04	0,06	0,05	0,006	0,008

Para o caso 2, os custos de distribuição foram adequados de acordo com a nova configuração que foi proposta, conforme mostra o Quadro (4.3a), onde P4 e P8 representam pontos de transbordo.

Para formular o indicador de desempenho ambiental, foram utilizados dados de inventário de impactos ambientais para a etapa de transporte. Os fatores de emissão para cada categoria de impacto da metodologia ReCiPe foram retirados do banco de dados do *ecoinvent* 3.3. Para o transporte de tomates do produtor até o armazém foi utilizado o banco de dados: mercado para transporte, frete, caminhão 3,5 a 7,5 toneladas métricas, EURO6, GLO, *midpoint* e *endpoint*). Para o transporte do armazém até o mercado foi utilizado o banco de dados: mercado dos transportes, frete, caminhão 16-32 toneladas métricas, EURO6, GLO, *midpoint* e *endpoint*. Os valores foram ajustados de acordo com o fluxo de referência de cada caso de estudo.

### 4.3.3 Modelo (etapa 3)

O problema de otimização foi formulado por meio de um modelo de Programação Linear (PL) envolvendo variáveis contínuas, tendo por base o modelo de transporte adaptado por Zhang *et al.* (2014).

No modelo existem restrições relacionadas ao transporte de tomates de cada produtor  $i$  para cada armazém  $j$  destinado a cada armazém  $k$ . Essas restrições (s.a) são apresentadas na equação (4.3a).  $x_{1ij}$  e  $x_{2jk}$  são variáveis que representam a quantidade de tomates (kg) transportados do produtor  $i$  para o armazém  $j$  e do armazém  $j$  para o mercado  $k$ ,

respectivamente. As quantidades  $sp_i$  e  $da_j$  referem-se à produção de tomates (kg) oferecida pelo produtor  $i$  (kg) e requerida pelo armazém  $j$ , respectivamente. As variáveis  $sa_j$  e  $dm_k$  são as quantidades (kg) oferecidas pelo armazém  $j$  e as quantidades (kg) demandadas pelo mercado  $k$ , respectivamente. Já  $b_i$  refere-se à quantidade mínima (kg) que o produtor  $i$  deve entregar ao armazém  $j$ .

$$\text{s.t.} : \left\{ \sum_j x_{1ij} \leq sp_i, \sum_k x_{2jk} \leq sa_j, b_i \leq x_{1ij}, \sum_i x_{1ij} \geq da_j, \sum_j x_{2jk} \geq dm_k, \right. \quad (4.3a)$$

No sistema multiobjetivo proposto, foram usadas duas funções objetivo diferentes, que descrevem aspectos ambientais e econômicos da cadeia de suprimentos estudada. Como indicador de desempenho econômico, foi utilizado o custo de transporte do tomate, conforme indicado nas equações (4.2b). As variáveis  $cp_{ij}$  e  $ca_{jk}$  são os custos de transporte (US\$/kg) do produtor  $i$  ao armazém  $j$  e do armazém  $j$  ao Mercado  $k$ , respectivamente.

$$\min F(f_1) = \left( \sum_{i,j} x_{1ij} cp_{ij} + \sum_{j,k} x_{2jk} ca_{jk} \right), \quad (4.2b)$$

Como indicador de desempenho ambiental, foram incorporados os impactos ambientais da etapa de transporte dos tomates, de acordo com a metodologia ReCiPe. Conforme apresentado na Equação (4.3c), as variáveis  $tp_{ij}$  são a distância do produtor  $i$  ao armazém  $j$  (km) e  $tw_{jk}$  é a distância do armazém  $k$  ao mercado  $j$  (km). Os parâmetros  $ecoPW_{ij}$  e  $ecoWM_{jk}$ , representam o impacto do transporte por quilograma de produto: do produtor ao armazém, do armazém ao mercado, respectivamente.

$$\min F(f_2) = \left( \sum_{i,j} x_{1ij} tp_{ij} ecoPW_{ij} + \sum_{j,k} x_{2jk} tw_{jk} ecoWM_{jk} \right), \quad (4.3c)$$

As equações 4.1a, 4.2b e 4.3c foram resolvidas em GAMS usando como solucionador o solver CPLEX 12.1. A fronteira de Pareto foi determinada a fim de mostrar as relações de troca entre os objetivos. O método  $\epsilon$ -restrição foi utilizado para otimização das funções objetivo. Os pontos de joelho foram utilizados como critério para a obtenção de uma Melhor Solução Praticável (MSP).

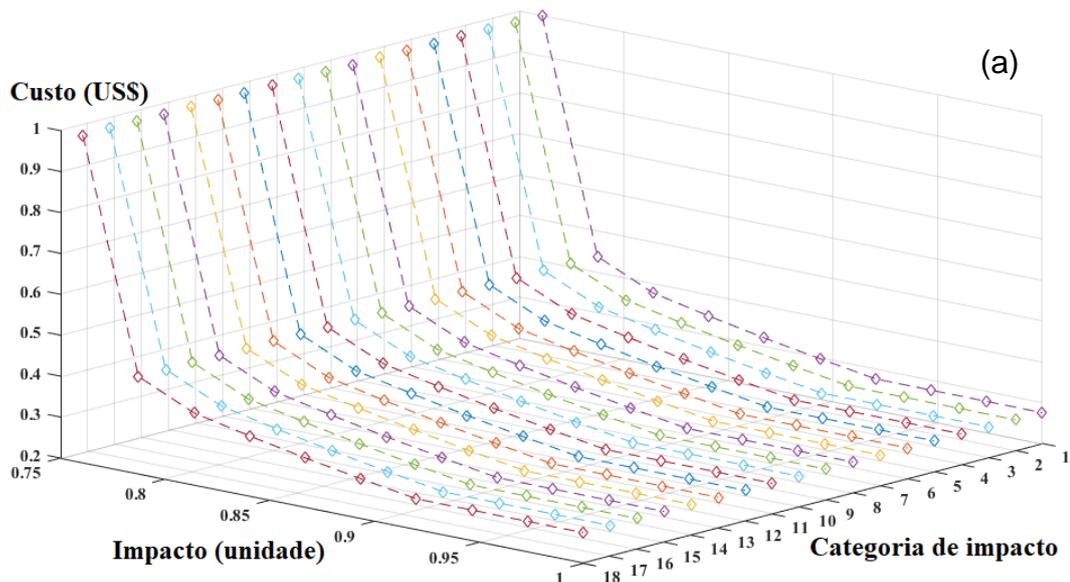
#### 4.3.4 Resultados (etapa 4)

Os resultados da otimização foram analisados para o caso 1 (C1) e para o caso 2 (C2). O método  $\epsilon$ -restrição foi utilizado para minimização da função custo, tendo a função impacto como restrição. Os indicadores de impacto analisados em nível *endpoint* e *midpoint*, são mostrados na Tabela 4.3f, com as respectivas siglas (SG) e unidades.

Tabela 4.3f: Indicadores de impacto do ciclo de vida, distribuídos por categorias *midpoint* e *endpoint*, segundo a metodologia ReCiPe.

SG	Categorias de impacto <i>midpoint</i>	SG	Categorias de impacto <i>endpoint</i>
M1	Ocupação de terras agrícolas (m <sup>2</sup> a)	E1	Ocupação de terras agrícolas (pts)
M2	Mudanças climáticas (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	E2	Mudanças climáticas, ecossistemas (pts)
M3	Depleção de recursos fósseis (kg oil-Eq)	E3	Ecotoxicidade da água doce (pts)
M4	Ecotoxicidade da água doce (kg 1,4-DC)	E4	Eutrofização da água doce (pts)
M5	Eutrofização da água doce (kg 1,4-DC)	E5	Ecotoxicidade marinha (pts)
M6	Toxicidade humana (kg 1,4-DC)	E6	Transformação de terras virgens (pts)
M7	Radiação ionizante (kg U235-Eq)	E7	Acidificação terrestre (pts)
M8	Ecotoxicidade marinha (kg 1,4-DC)	E8	Ecotoxicidade terrestre (pts)
M9	Eutrofização marinha (kg N-Eq)	E9	Ocupação de terras urbanas (pts)
M10	Depleção de recursos minerais (kg Fe-Eq)	E10	Mudanças climáticas, saúde humana (pts)
M11	Transformação de terras virgens (m <sup>2</sup> a)	E11	Toxicidade humana (pts)
M12	Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11)	E12	Radiação ionizante (pts)
M13	Formação de material particulado (kg PM10-Eq)	E13	Depleção da camada de ozônio (pts)
M14	Formação de oxidante fotoquímico kg (NMVOC <sup>3</sup> ar)	E14	Formação de material particulado (pts)
M15	Formação de oxidante fotoquímico (kg SO <sub>2</sub> -Eq)	E15	Formação de oxidante fotoquímico (pts)
M16	Ecotoxicidade terrestre (kg 1,4-DC)	E16	Depleção de recursos fósseis (pts)
M17	Ocupação de terras urbanas (m <sup>2</sup> a)	E17	Depleção de recursos minerais (pts)
M18	Depleção de água (m <sup>3</sup> )		

Para cada caso de estudo, a fronteira de Pareto foi obtida por otimização de uma função objetivo (custo) e subdivisão do domínio da outra função objetivo (impacto ambiental) em 10 subintervalos e deixando-a como uma restrição. Para os dois casos analisados, dependendo da posição na curva de Pareto, diferentes soluções ótimas podem ser obtidas podendo representar a Melhor Solução Praticável (MSP) para esse estado particular da CS. Como resultado encontraram um intervalo ótimo ambiental global para o sistema. Neste trabalho, as fronteiras de Pareto foram traçadas nos eixos *x* e *y* para cada caso de estudo da CS de tomates. A Figura 4.3b apresenta as fronteiras de Pareto formadas quando variamos a função impacto para C1 e C2.



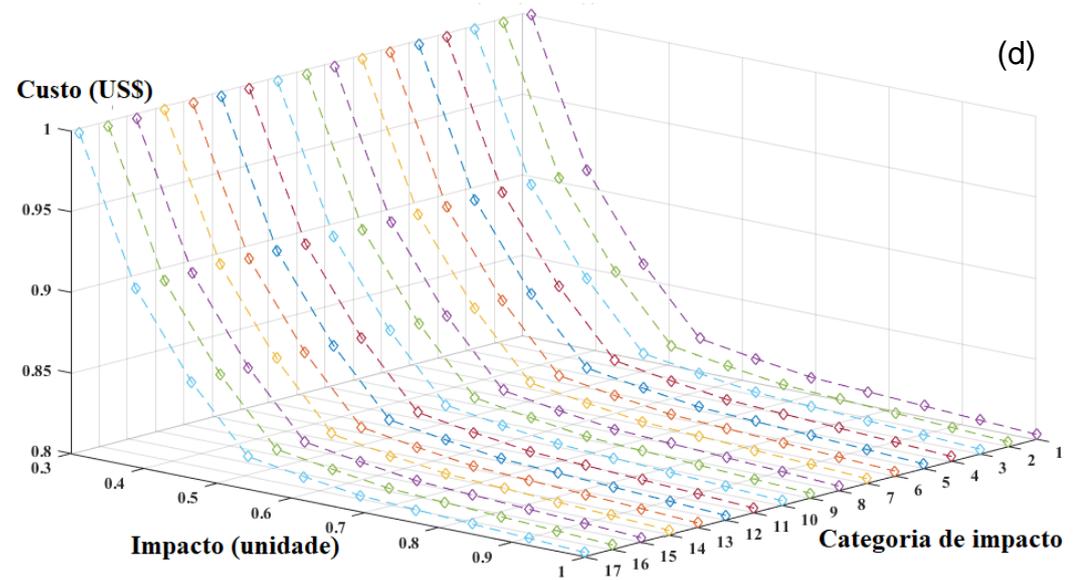
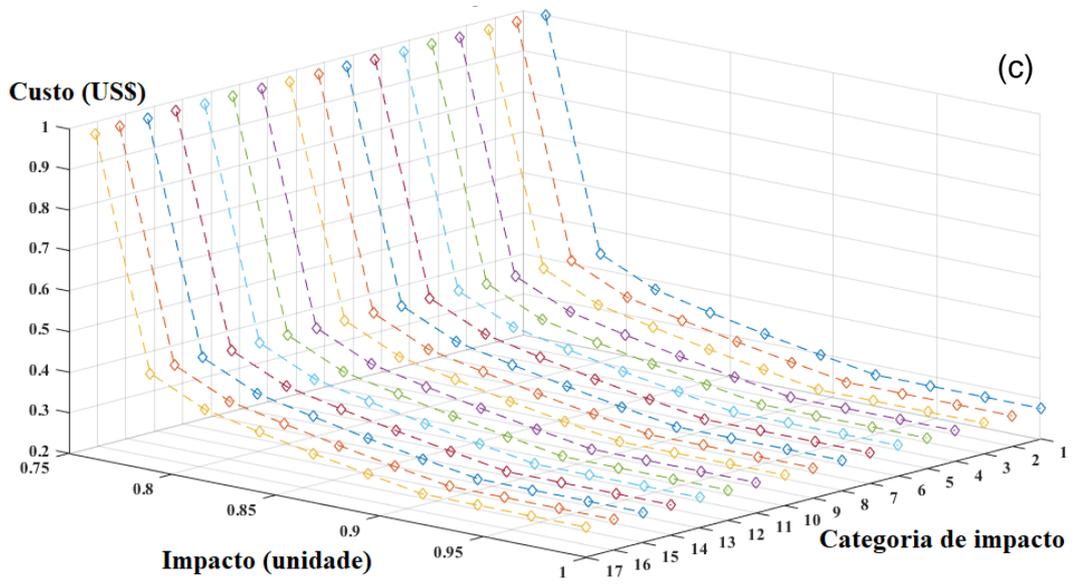
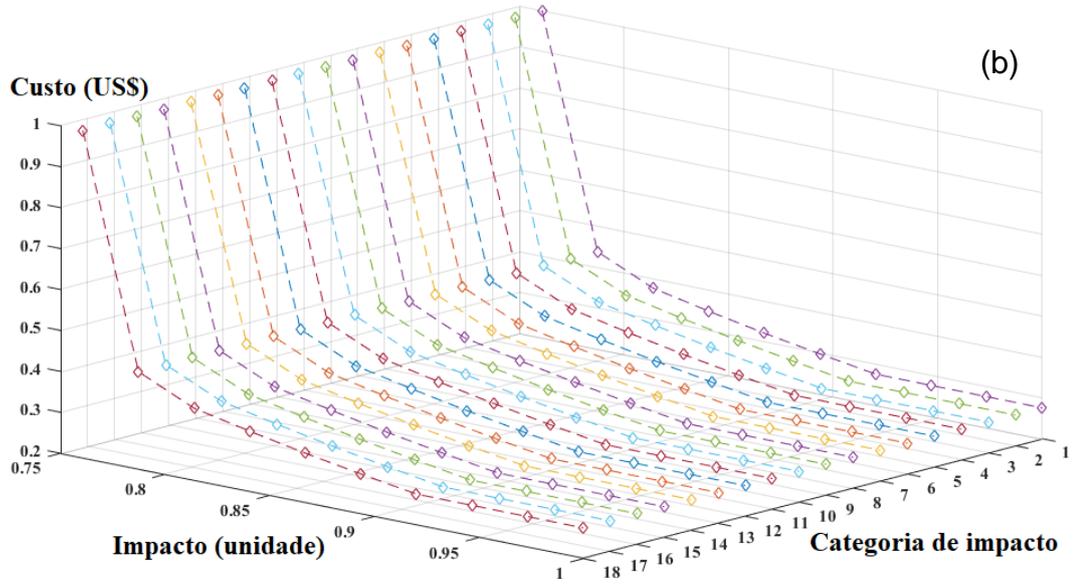


Figura 4.3b: Conjunto de frentes de Pareto para as categorias de impacto ambiental da metodologia ReCiPe. (a) e (b) Curvas de Pareto *midpoint* e *endpoint* formadas para C1. (c) e (d) Curvas de Pareto *midpoint* e *endpoint* formadas para C2.

Em geral, as frentes de Pareto apresentadas na Figura 4.3b auxiliam no exame da relação entre os dois objetivos, por meio das frentes de Pareto correspondentes. Foram geradas 70 frentes de Pareto para os casos de estudo, sendo 18 curvas *midpoint* e 17 curvas *endpoint* para o Caso 1, conforme mostram os Anexo 'A1' e 'A2'. Também foram geradas 18 curvas *midpoint* e 17 curvas *endpoint* para o Caso 2, conforme mostram os Anexo 'B1' e 'B2'. Todas as curvas de Pareto mostram as relações de trocas entre os respectivos objetivos. Observa-se ainda que todas as curvas possuem formas semelhantes e com partes distintas: I) observa-se que com o aumento da uma função objetivo, a outra experimenta uma diminuição acentuada na primeira parte da curva, o que indica a necessidade de mudanças estruturais; II) em seguida, a função diminui quase que linearmente na segunda parte, indicando que alterações podem ser conseguidas ajustando os limites superiores da função; III) na última parte quase nenhuma melhoria pode ser alcançada, ou seja, as limitações da CS são atingidas.

A metodologia ReCiPe utilizada nesse trabalho tem potencial para converter as emissões de substâncias perigosas em indicadores de categoria de impacto no nível *midpoint* e *endpoint*, como: acidificação, mudança climática e ecotoxicidade. Atualmente, existe na gestão da CS de produtos da hortifruticultura uma grande preocupação com relação a emissão de Gases de Efeito Estufa e as Mudanças Climáticas (CAMILO E RAVAGNANI, 2014). Consoante a isso, deu-se importância relativa à categoria de impacto mudanças climáticas, conforme mostra a Figura 4.3c.

O ponto "x" na Figura 4.3c representa o "ponto de joelho", um ponto de equilíbrio entre a função de custo objetivo e a função impacto ambiental. Entre todos os pontos mostrados na curva, as soluções mais próximas do "ponto de joelho" são: a) custo = US\$ 8.345,77 e impacto = 79.723,76 kg CO<sub>2</sub> eq. para C1; b) custo = US\$ 8.347,05 reais e impacto = 1.396,92 kg CO<sub>2</sub> eq. para C1; c) custo = US\$ 8.347,05 e impacto = 2.210,11 kg CO<sub>2</sub> eq. para C1; d) custo = US\$ 1.704,50 e impacto = 16.179,16 pontos para C2; e) custo = US\$ 1.704,50 e impacto = 283,49 pontos para C2; e) custo = US\$ 1.704,50 e impacto = 448,52 pontos para C2. Esses pontos representam uma possível solução ótima para cada caso, e que minimiza as funções objetivo. Por exemplo, se compararmos C1 com C2, temos: tanto para a categoria de impactos mudanças climáticas *midpoint*, como para a categoria de impacto mudanças climáticas – qualidade dos ecossistemas – *endpoint* e para a categoria mudanças climáticas – qualidade dos ecossistemas – *endpoint*, foi possível notar uma redução de

aproximadamente 20% para impactos e 20% para custos. Da mesma forma que Camilo *et al.* (2017) foi possível afirmar que com a criação de pontos de transbordo entre produtores existem grandes possibilidades de melhorias na gestão de SC.

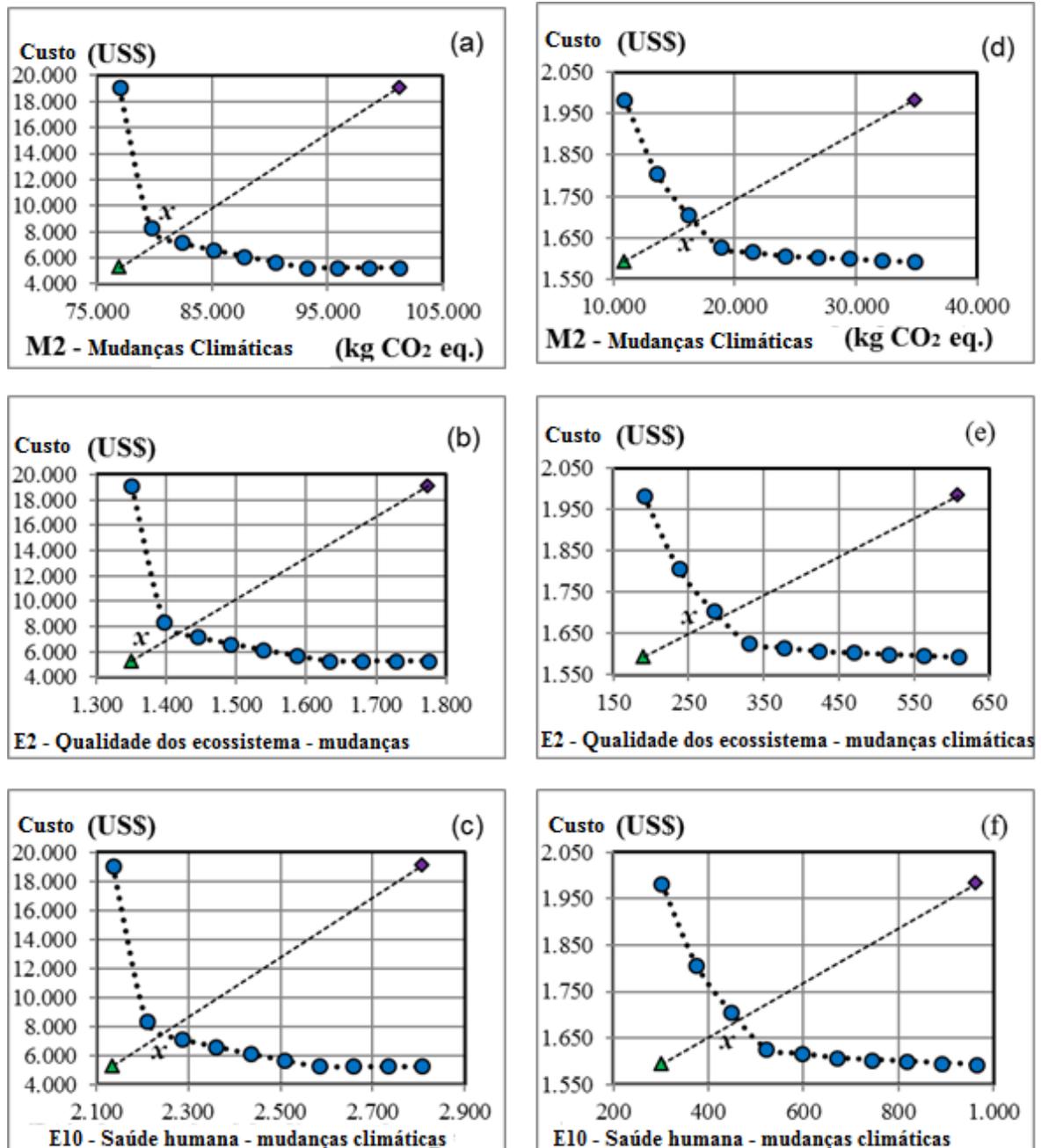


Figura 4.3c: fronteira de Pareto formada otimizando a função custo e restringindo a função impacto ‘mudanças climáticas’. (a) Fronteira de Pareto *midpoint* para o C1. (b) e (c) Fronteiras de Pareto *endpoint* para C1. (d) Fronteira de Pareto *midpoint* para o C2. (e) e (f) Fronteiras de Pareto *endpoint* para C2.

Outro fator que levou a escolha da categoria de impacto ambiental mudanças climáticas para ampliação das discussões nesse trabalho, foi o fato de essa categoria

apresentar o maior impacto total entre todas as categorias *midpoint* e *endpoint*, conforme mostram as Figuras 4.3d e 4.3e.

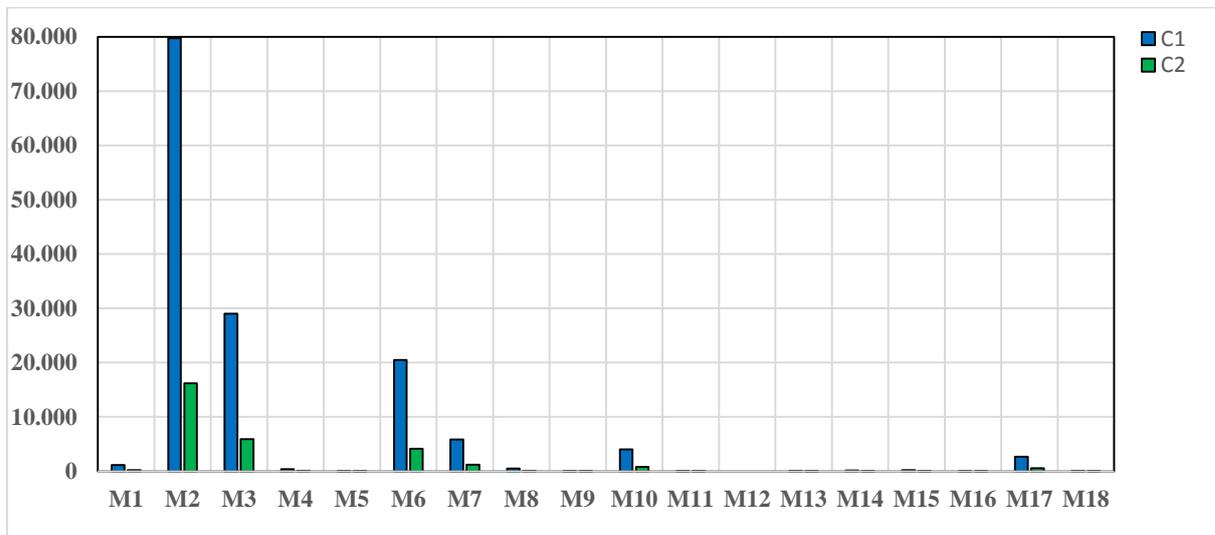


Figura 4.3d: Comparação das categorias *midpoint* de impacto normalizadas – casos C1 e C2.

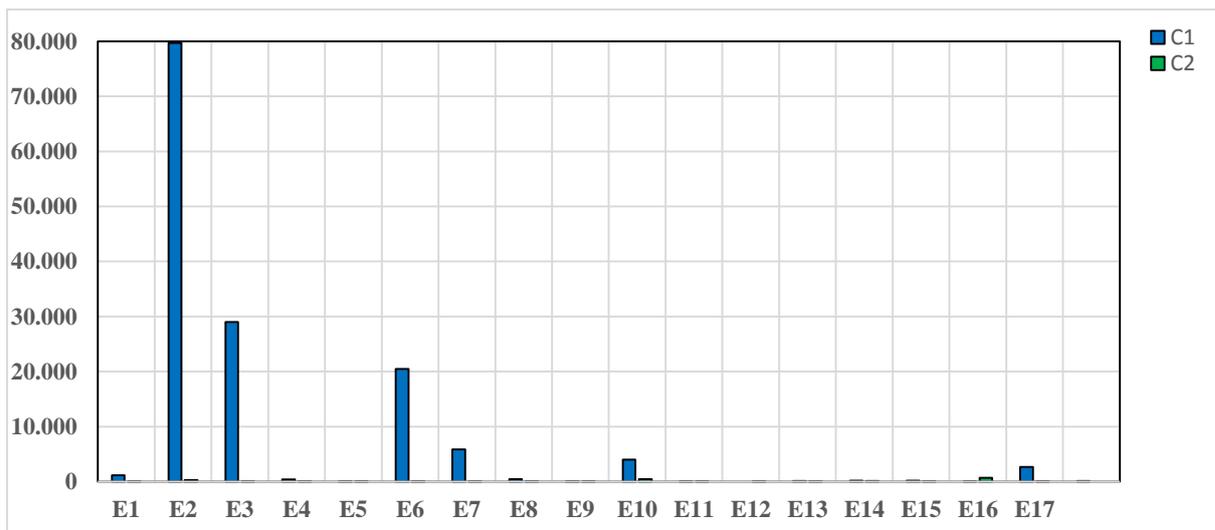


Figura 4.3e: Comparação das categorias *endpoint* de impacto normalizadas – casos C1 e C2.

Muitos métodos permitem que os resultados do indicador de categoria de impacto sejam comparados por um valor de referência (ou normal), conforme mostra as Figuras 4.3d e 4.3e. Isto significa que a categoria de impacto é dividida pela referência e essa referência pode ser escolhida livremente. De acordo com Khoshnevisan *et al.* (2013) a normalização pode ser útil para comunicar os resultados a especialistas que não são da área de ACV, visto que após a normalização, os indicadores da categoria de impacto obtêm todos a mesma unidade, o que torna mais fácil compará-los.

Com base nos resultados apresentados nas figuras 4.3d e 4.3e, em ambos os casos o indicador mudanças climáticas (M2, E2 e E10) desempenhou o papel mais importante, seguido por M2, M3, M6, M7 e M10, em nível *midpoint*, e seguido por E3, E6, E7 e E10, em

nível *endpoint*. Esses sistemas foram diretamente influenciados pela liberação de gases de efeito estufa liberados pelo escapamento de veículos automotores durante o transporte de tomates do produtor até o armazém e do armazém até o supermercado. Durante o transporte existem diferentes distâncias a serem percorridas por caminhões de pequeno e médio porte. Esses veículos utilizam diferentes tipos de combustível, o que pode influenciar no processo, implicando também nas quantidades de impactos gerados nessa cadeia de suprimentos. A quantidade de impactos gerados por conjuntos de dados, para os dois casos, é apresentada nas figuras (4.3f) e (4.3g).

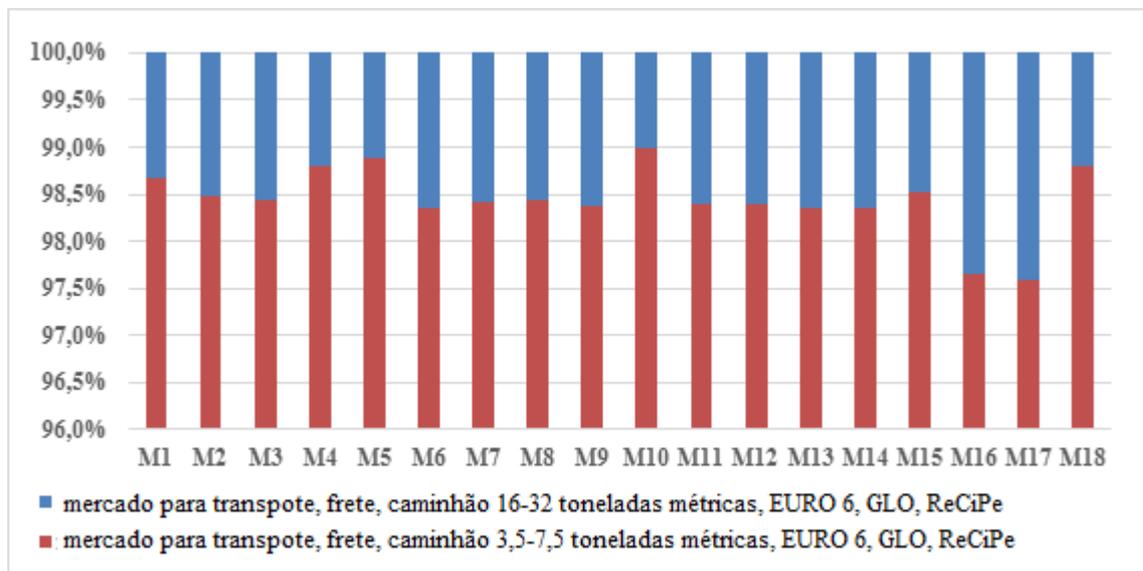


Figura 4.3f: contribuição do conjunto de dados escolhido para as categorias de impacto ambiental *midpoint* na produção de tomates, aplicado ao Caso 1.

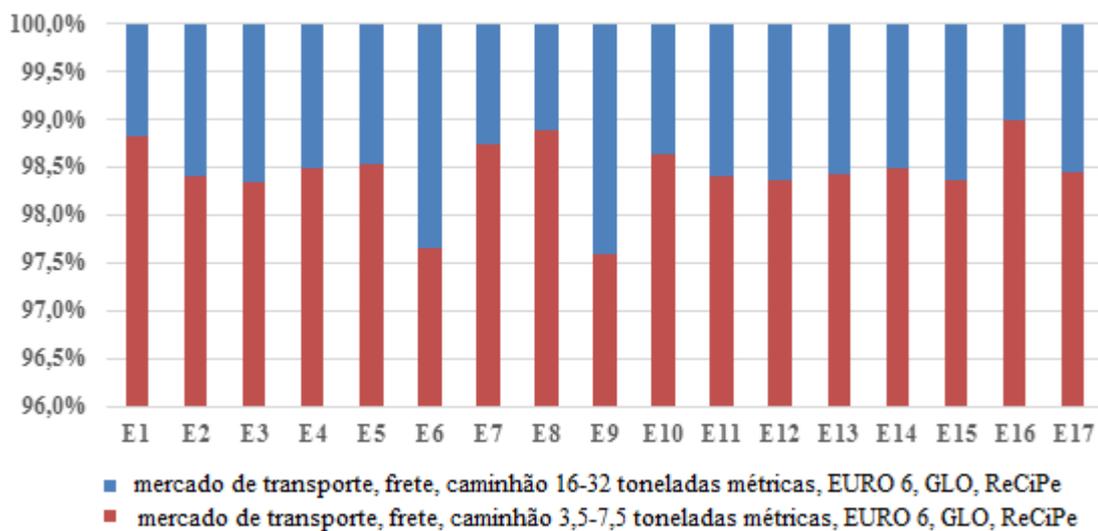


Figura 4.3g: contribuição do conjunto de dados escolhido para as categorias de impacto ambiental *endpoint* na produção de tomates, aplicado ao Caso 2.

A repartição dos impactos apresentada nas Figuras (4.3f) e (4.3g), indica que a maior contribuição de emissões se mostra na fase de transporte do produtor ao armazém, com uma contribuição acima de 97% para todas as categorias de impacto, tanto para o caso C1 como para o C2. Com relação a repartição de impactos os resultados mostraram que para os casos C1 e C2, os efeitos das emissões de gases estufa durante a distribuição de tomates foram notáveis principalmente na categoria mudanças climáticas.

O método de otimização utilizado nesse trabalho pode auxiliar no encontro de soluções ideais para o problema, podendo levar a um ótimo desempenho global da CS. Além disso, a otimização sustentável pode auxiliar no objetivo de redução dos impactos ambientais do sistema, a partir do estudo das soluções encontradas para o modelo. Nesse sentido, para a avaliação e visualização de soluções individuais de Pareto, foi usado um diagrama de aranha, como mostrado nas figuras 4.3h, 4.3i, 4.3j e 4.3k.

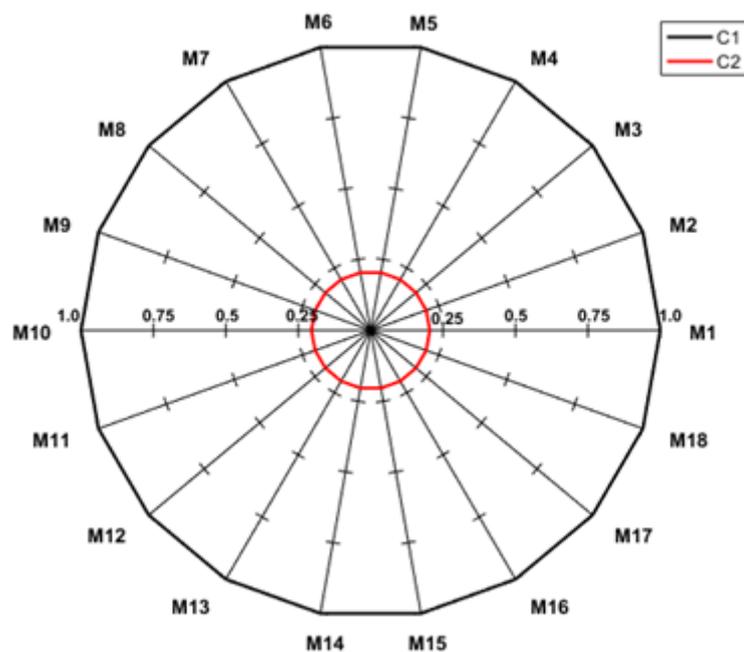


Figura 4.3h: Comparação entre as soluções do Caso 1 e as soluções de Pareto para o Caso 2 otimizando a função custo para todas categorias de impacto ambiental da metodologia ReCiPe em nível *midpoint* e normalizando os resultados.

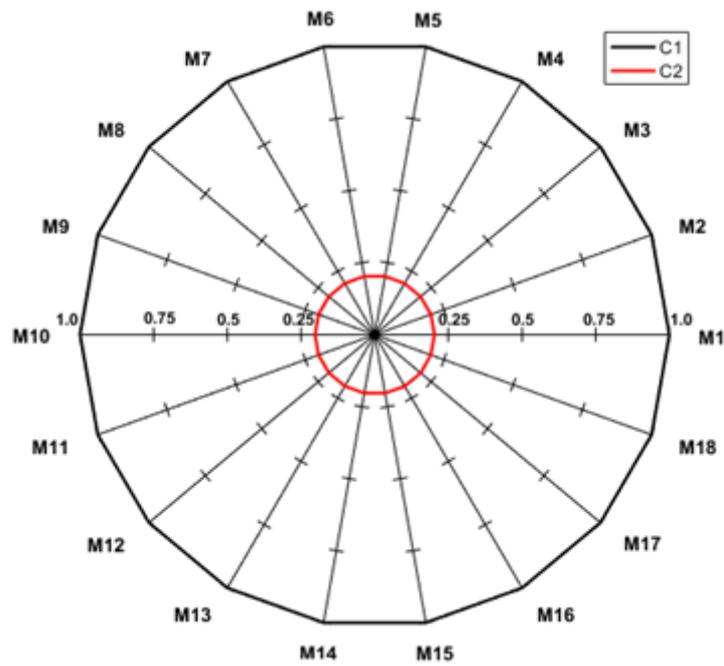


Figura 4.3i: Comparação entre as soluções do Caso 1 e outras soluções de Pareto para o Caso 2 otimizando função a impacto para todas categorias de impacto ambiental da metodologia ReCiPe em nível *midpoint* e normalizando os resultados.

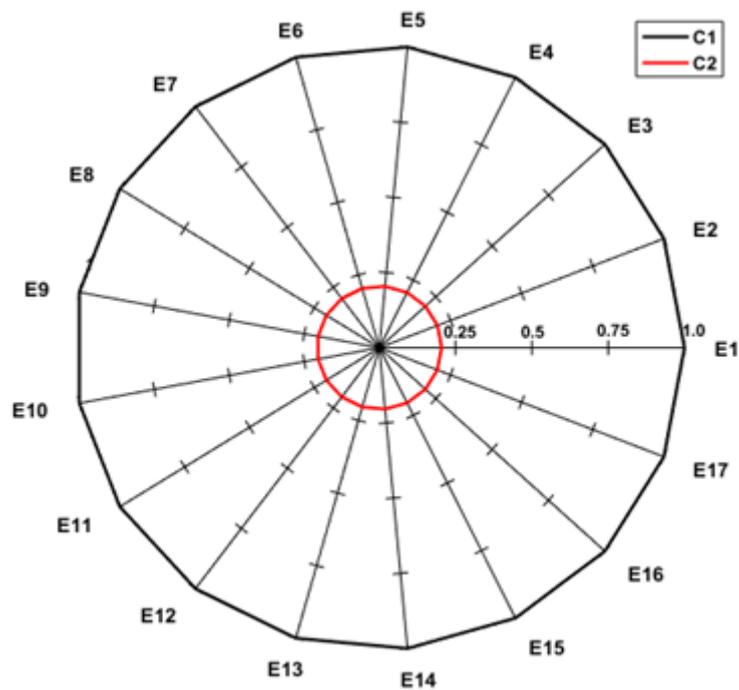


Figura 4.3j: Comparação entre as soluções do Caso 1 e outras soluções de Pareto para o Caso 2 otimizando a função custo para todas categorias de impacto ambiental da metodologia ReCiPe em nível *endpoint* e normalizando os resultados.

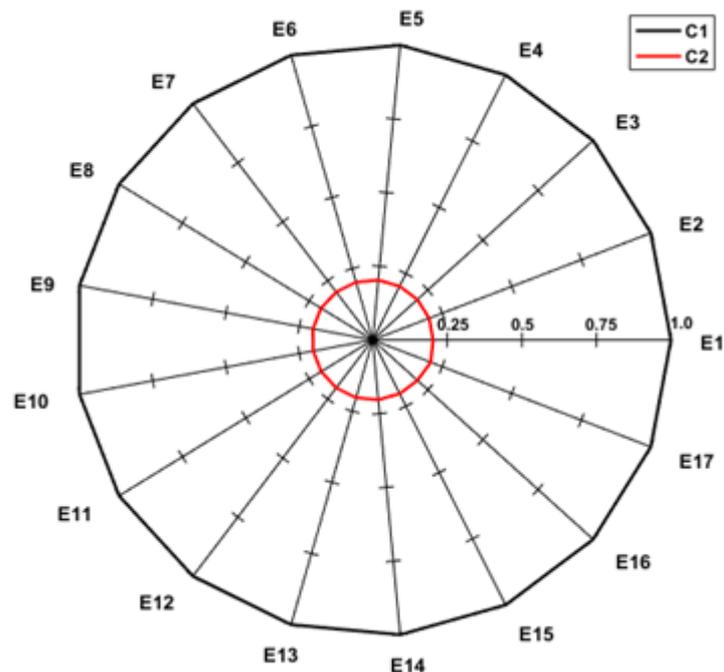


Figura 4.3k: Comparação entre as soluções do Caso 1 e outras soluções de Pareto para o Caso 2 otimizando a função impacto para todas categorias de impacto ambiental da metodologia ReCiPe em nível *endpoint* e normalizando os resultados.

Nas Figuras 4.3h, 4.3i, 4.3j e 4.3k, cada extremidade do gráfico de aranha representa uma solução ótima de Pareto. Para os casos de estudo aqui apresentados, foram adotadas (a título de comparação) as soluções mais próximas ao “ponto de joelho” de cada fronteira de Pareto, utilizando todos os indicadores de impacto ambiental aqui apresentados. Cada diagrama possui duas formações circulares, que representam as duas funções objetivo do problema. Foram usadas escalas normalizadas, isto é, o valor ‘1’ na escala corresponde ao máximo e o valor ‘0’ corresponde ao valor de função objetivo mínimo encontrado entre todas as soluções de Pareto. Os diagramas de aranha apresentam as soluções otimizadas selecionadas a partir do “ponto de joelho” para os casos C1 e C2. As soluções de Pareto que formam o diagrama descrevem os pontos mais equilibrados entre os dois objetivos. Para todos os casos, o custo total, para os “pontos de joelho” foi ligeiramente superior ao valor mínimo ótimo, uma vez que isso depende do tomador de decisão responsável pela gestão da CS.

#### 4.3.5 Conclusões (etapa 5)

Nesse trabalho foi realizada uma otimização sustentável da cadeia de suprimentos de tomates, considerando dois indicadores-chave de desempenho: custo de distribuição e impactos ambientais. A estrutura de otimização multiobjetivo que incorporam esses

indicadores de sustentabilidade foi desenvolvido em GAMS e aplicada em dois casos de estudo da região do município de Umuarama, Estado do Paraná, Brasil.

A ênfase dessa etapa residiu na aplicação do quadro proposto para duas configurações da CS, num estudo de caso com dados reais. Nesse sentido, o quadro proposto pode ser aplicado a uma vasta gama de cadeias de suprimentos. Os resultados mostraram claras relações de trocas entre os objetivos econômico e ambiental. Em particular, as curvas de Pareto formadas mostram um potencial de minimização na emissão de gases de efeito estufa, bem como redução dos impactos ambientais gerados na CS.

Nessa etapa, o indicador de impacto mudanças climáticas apresentou o maior impacto total entre todas as categorias de impacto ambiental aqui apresentadas. Isso porque esse sistema foi diretamente influenciado pela liberação de gases de efeito estufa originários do escapamento de veículos automotores durante o transporte de tomates. Além disso, existem diferentes distâncias a serem percorridas por caminhões de pequeno e médio porte e existem restrições quanto a utilização de diferentes tipos de combustível. As restrições de processo, podem influenciar nas quantidades de impactos gerados nessa cadeia de suprimentos.

É importante destacar a contribuição do conjunto de dados escolhido para cada categoria de impacto ambiental. Nesse sentido, a repartição dos impactos indica que a maior contribuição de emissões se mostra na fase de transporte do produtor ao armazém, com uma contribuição acima de 97% para todas as categorias de impacto, tanto para o caso C1 como para o C2. Ainda com relação a repartição de impactos, os resultados mostraram que para os casos C1 e C2, os efeitos das emissões de gases do efeito estufa durante a distribuição de tomates foram notáveis principalmente na categoria mudanças climáticas.

O método de otimização utilizado nesse trabalho pode auxiliar no encontro de soluções ideais para o problema, podendo levar a um ótimo desempenho global da CS. Além disso, a otimização sustentável pode auxiliar no objetivo de redução dos impactos ambientais do sistema, a partir do estudo das soluções encontradas para o modelo. As soluções de Pareto formadas pela observação dos “pontos de joelho” descrevem os potenciais pontos mais equilibrados entre o objetivo econômico e o ambiental. Contudo, isso dependerá do tomador de decisão responsável de gestão sustentável da CS.

#### 4.4. MODELO PARA GESTÃO DA SUSTENTABILIDADE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DE TOMATES E ALFACE UTILIZANDO OS INDICADORES: AMBIENTAL, ECONÔMICO E SOCIAL.

##### 4.4.1. Declaração do Problema (etapa 1)

A falta de planejamento é a maior fonte de problemas quando se fala em cadeia de suprimentos. Nesse sentido, o estabelecimento de uma gestão sustentável implica em uma série de mudanças ao longo da cadeia produtiva, com a inserção de relacionamentos sustentáveis com fornecedores, redução do impacto ambiental dos produtos e valorização social de colaboradores e comunidades. Portanto, um modelo voltado para a gestão da sustentabilidade na cadeia de suprimentos visa, obter um desempenho positivo nas três dimensões da sustentabilidade: econômica, ambiental e social.

Para uma rede de distribuição integrar lucro, sociedade e meio ambiente, ela deve ir além do ciclo de vida do produto. Ela deve ser responsável pelo impacto gerado pelo processo produtivo no seu escopo de atuação e também pelos impactos produzidos após o consumo. Ou seja, as instituições devem ter controle do seu produto nos elos da CS, desde a produção até a chegada nos mercados, sem descuidar dos ganhos sociais que podem ser alcançados.

Dado um horizonte de tempo fixo dividido em um conjunto de períodos de semanas, um conjunto de instalações existentes da CS, os preços de venda dos produtos, o custo de distribuição da CS e dados ambientais (emissões associadas ao transporte da rede), o problema abordado neste trabalho visa determinar uma configuração de CS para o transporte de tomates e alface com mínimos impactos, mínimos custos e máximo lucro de sustentabilidade possível.

##### 4.4.2. Casos de estudo (etapa 2)

A estrutura de três escalões de CS de produtos da hortifruticultura foi tomada como referência, conforme mostra a Figura 4.4a. A rede inclui os seguintes elementos: dois tipos de produtos (tomate e alface), um conjunto de produtores de onde partem os produtos; um conjunto de armazéns onde os produtos são armazenados antes de serem enviados para os supermercados; e um conjunto de mercados onde os produtos estão disponíveis para os

clientes. As decisões a serem tomadas na CS incluem: avaliação de desempenho e apresentar pontos de equilíbrio entre lucro, custo e impacto ambiental.

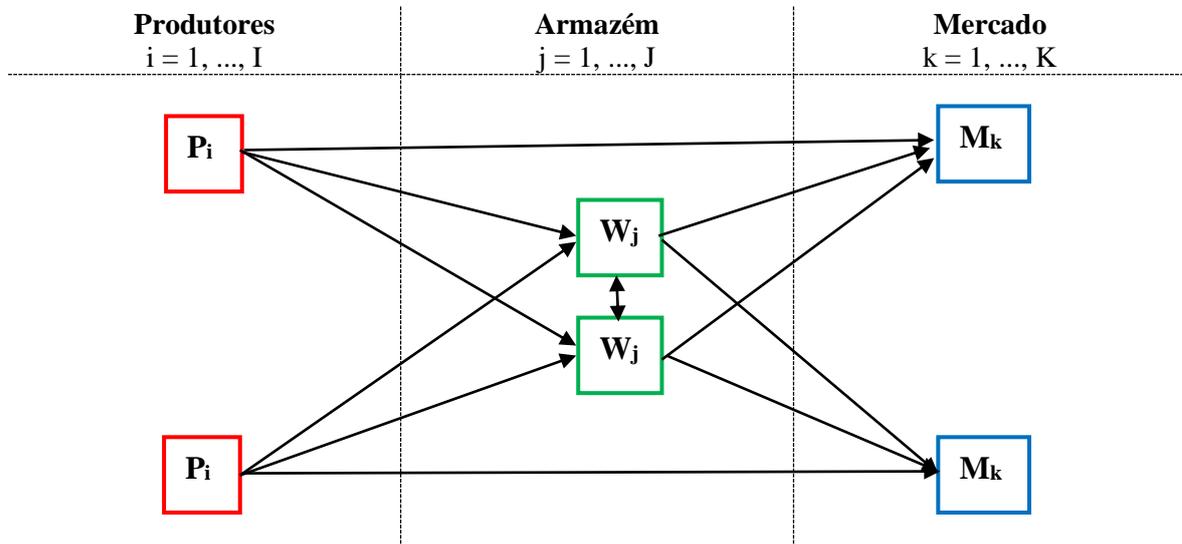


Figura 4.4a: esquema que mostra a estrutura de uma CS que liga produtores, armazéns e mercados.

Os dados de entrada de produção para a formulação dos indicadores de desempenho foram obtidos junto à Cooperativa de Produtores de Umuarama (COOPERU) para as quantidades de tomate e alface recebidas no ano de 2015. Em especial para esse modelo, os custos de distribuição foram dados em reais (R\$).

Para formular o indicador de desempenho ambiental, foram utilizados dados de inventário de impactos ambientais para a etapa de transporte da metodologia ReCiPe, retirados do banco de dados do *ecoinvent* 3.3. Os valores foram ajustados de acordo com o fluxo de referência de cada caso de estudo.

#### 4.4.3 Modelo (etapa 3)

Nesta seção, será apresentada a formulação de um modelo de Programação Linear Mista Inteira (PLMI) que incorpora os princípios da ACV, resolvível em GAMS. Esse modelo de PLMI foi baseado nos modelos de cadeia de suprimentos ambientalmente sustentáveis discutidas por Guillén-Gosálbez e Grossmann (2009), Mele *et al.* (2011) e Zhang *et al.* (2014) e Kostin *et al.* (2011).

A inovação do modelo aqui apresentado, foi atribuída a otimização sustentável do objetivo “lucro de sustentabilidade”, realizada juntamente com os objetivos “custo” e “impacto ambiental”. Além disso, o modelo foi expandido para o transporte de mais de um produto além do tomate, no caso a alface. Foram incluídos blocos de equações: as restrições e as funções objetivo. Um esboço de cada um desses conjuntos de equações é dado a seguir:

### Restrições

Os balanços de massa foram feitos por produto e para cada nó incorporado na rede, conforme mostram as equações 4.4a e 4.4b. Nelas  $x_{1ij}$ ,  $x_{2jk}$  e  $x_{3jk}$  são variáveis que representam as quantidades de tomates e alfaces em quilogramas. Foram consideradas a produção e o transporte de cada produto  $w$  do produtor  $i$  até o armazém  $j$ , existindo a possibilidade de trocas entre armazéns  $jj$ . Foi considerado um período  $t$  em semanas e as quantidades produzidas ( $INV_{wjt}$  e  $INV_{w,j,t+1}$ ),  $INV_{wjt}$  assumiu o valor zero.

$$\sum_i x_{1wijt} + \sum_{jj} x_{3w,jj,j,t} + INV_{wjt} = \sum_k x_{2wjk} + \sum_{jj} x_{3w,j,jj,t} + INV_{w,j,t+1} \quad (4.4a)$$

$$\sum_i x_{1wijt} + \sum_{jj} x_{3w,jj,j,t} + INV_{w,j,t-1} = \sum_k x_{2wjk} + \sum_{jj} x_{3w,j,jj,t} + INV_{wjt} \quad (4.4b)$$

No modelo existem ainda restrições de balanço de massa relacionadas à produção e ao transporte do produto  $w$  de cada produtor  $i$  para cada armazém  $j$  e também de cada produtor  $i$  diretamente ao mercado  $k$ , conforme mostra a equação (4.4c). A quantidade  $sp_{iw}$  referem-se à produção de tomates e alfaces (kg) oferecidas pelo produtor  $i$  (kg) e requerida pelo armazém  $j$ .

$$\sum_j x_{1wijt} + \sum_j x_{4wikt} \leq sp_{iw} \quad (4.4c)$$

As vendas de produtos aos mercados são determinadas a partir das quantidades de produtos enviados aos armazéns e demandadas pelos supermercados, conforme mostram as equações (4.4d e 4.4e). As variáveis  $sa_{jw}$  e  $dm_k$  são as quantidades (kg) oferecidas pelo armazém  $j$  e as quantidades (kg) demandadas pelo mercado  $k$ , respectivamente.

$$\sum_i x_{1wijt} + \sum_{jj} x_{3w,jj,j,t} + INV_{wjt} \leq Sa_{jw} \quad (4.4d)$$

$$\sum_j x_{2wjk} + \sum_i x_{4wikt} \geq dm_{kw} * TXDEM(t) \quad (4.4e)$$

Existe a possibilidade de transporte por período ligando produtor  $i$  e armazém  $j$ , entre armazéns  $jj$  e armazém  $j$  e mercado  $k$ , conforme mostram as equações (4.4f, 4.4g e 4.4h). As variáveis binárias  $INTPA_{wijt}$ ,  $INTAM_{wjk}$  e  $INTAA_{w,jj,jt}$  representam a existência ou não de ligação entre produtores e armazéns, armazéns e mercados e entre armazéns, respectivamente. Os parâmetros  $capCAMP_i$ ,  $capCAMA_j$ ,  $capCAMAA_j$  e  $capCAMA_j$  representam a capacidade (kg) dos veículos que transportam o produto.

$$x_{1ij} - capCAMP_i * INTPA_{wijt} \leq 0, \quad x_{1wijt} - capMIN_i * capCAMP_i * INTPA_{wijt} \geq 0 \quad (4.4f)$$

$$x_{3w,jj,jkt} - capCAMAA_j * INTAA_{w,jj,jt} \leq 0 \quad (4.4g)$$

$$x_{2wjk} - capCAMA_j * INTAM_{wjk} \leq 0 \quad (4.4h)$$

Existem restrições de capacidade de transporte do produtor  $i$ , conforme mostram as equações (4.4i).

$$\sum_w x_{1wijt} - capCAMP_i \geq 0, \sum_w x_{4wikt} - capCAMP_i \geq 0 \quad (4.4i)$$

Existem restrições lógicas para: haver ligação entre produtor e mercado (Equações 4.4j); para não haver troca entre armazéns ao mesmo tempo (Equações 4.4k); e para não haver ligação entre mercado e produtor e armazém e produtor (Equação 4.4l).

$$x_{4wikt} - capCAMP_i * INTPM_{wikt} \leq 0, x_{4wikt} - capMIN_i * capCAMP_i * INTPM_{wikt} \geq 0 \quad (4.4j)$$

$$INTAA_{wj,jj,t} + INTAA_{w,jj,t} \leq 1, INTAA_{w,j,jj,t} = 0, x_{3w,i,jj,t} = 0 \quad (4.4k)$$

$$INTPM_{wikt} + INTPA_{wijt} \leq 1 \quad (4.4l)$$

### Funções Objetivo

O modelo aqui descrito deve atingir três alvos diferentes: o objetivo econômico é representado pelo custo total (custo de distribuição somado ao custo de produção), ao passo que as preocupações ambientais foram quantificadas por meio de um conjunto de dados referentes as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente durante a etapa de transporte, extraído do banco de dados do *ecoinvent* 3.3., para a metodologia ReCiPe, sendo que foi selecionado como indicado de impacto ambiental categoria a categoria mudanças climáticas. Além disso, foi utilizado com indicador social o lucro compartilhado pela cooperativa de produtores, tendo relação com a melhoria na renda, principalmente dos pequenos produtores de tomate e alface. O modelo mostra o desempenho econômico, ambiental e social para um único cenário, que é a CS atualmente atribuída. O objetivo da formulação matemática foi maximizar o lucro, minimizando custos e impactos ambientais.

O indicador econômico foi calculado somando os custos de produção com os custos de transporte em cada um dos períodos de tempo  $t$ , conforme mostram as equações (4.4m, 4.4n, 4.4o e 4.4p). As variáveis  $cp_i$ ,  $ca_j$  e  $caa_j$  são os custos de transporte (R\$/kg) do produtor  $i$  ao armazém  $j$  ou mercado  $k$ , do armazém  $j$  ao mercado  $k$ , ou entre armazéns  $jj$ .

$$custo(f_1) = \sum_t custo_t \quad (4.4m)$$

$$custo_t = custoPr od_t + custoTransp_t \quad (4.4n)$$

$$custoPr od_t = \left( \sum_{wij} x_{1wij} cprod_{ij} + \sum_{wik} x_{4wikt} cprod_{iw} TXINF_t \right) \quad (4.4o)$$

$$\begin{aligned}
\text{custoTran}P_i = & \left[ \left( \frac{\sum_{wijt} x_{1wijt}}{\text{capCAMP}_i} 2tp_{ij} \right) \left( \frac{cp_i}{\text{FDCam}P_i} \text{TXINF}_t \right) \right] + \left[ \left( \frac{\sum_{wjkt} x_{2wjkt}}{\text{capCAMA}_j} 2ta_{jk} \right) \left( \frac{ca_j}{\text{FDCam}A_j} \text{TXINF}_t \right) \right] \\
& + \left[ \left( \frac{\sum_{w,j,jj,t} x_{3w,j,jj,t}}{\text{capCAMA}_j} 2taa_{j,jj} \right) \left( \frac{caa_j}{\text{FDCam}AA_j} \text{TXINF}_t \right) \right] + \left[ \left( \frac{\sum_{wik} x_{4wik}}{\text{capCAMP}_i} 2tpm_{ik} \right) \left( \frac{cp_i}{\text{FDCam}P_i} \text{TXINF}_t \right) \right]
\end{aligned} \quad (4.4p)$$

O impacto ambiental foi quantificado pelo indicador mudanças climáticas (M2), os valores foram retirados do banco de dados do *ecoinvent* versão 3.3. As unidades encontradas nessa categoria (CO<sub>2</sub> eq.) são expressas tomando como referência o impacto do dióxido de carbono por quilograma de produto. Foi realizada uma avaliação do “berço ao portão”, ou seja, até a chegada no mercado. Isso se deu de acordo com as etapas do ciclo de vida de tomates e alfaces, sendo um procedimento necessário para determinação da quantidade total de emissões de gases do efeito estufa liberados na CS. Assim, foram consideradas duas principais fontes de emissões que contribuem para o indicador mudanças climáticas: a produção de tomates e alfaces (PRO<sub>M2</sub>) e as tarefas de transporte (TRANS<sub>M2</sub>), conforme mostram as equações (4.4.q, 4.4.r, 4.4.s). As variáveis  $tp_{ij}$  e  $tp_{jk}$  são a distância do produtor  $i$  ao armazém  $j$  (km) e do armazém  $j$  ao mercado  $k$  (km). Os parâmetros  $ecoPA_{M2ij}$ ,  $ecoAM_{M2jk}$ ,  $ecoAA_{M2j,jj}$  e  $ecoPM_{M2ik}$ , denotam as entradas dos inventários de ciclo de vida e representam o impacto do transporte por quilograma de produto: do produtor ao armazém ou mercado, do armazém ao mercado e entre armazéns. Esses parâmetros estão associados a um fluxo de referência de atividade. O fluxo de referência utilizado para o transporte de produtos foi uma unidade de massa (kg) transportada em uma unidade de distância (km).

$$eco_{M2} = PRO_{M2} + TRANS_{M2} \quad (4.4q)$$

$$PROD_{M2} = \left( \sum_{wijt} x_{1wijt} ecoPAE_{M2ij} + \sum_{wik} x_{4wik} ecoPROD_{M2w} \right) \quad (4.4r)$$

$$TRANS_{M2} = \left( \begin{aligned} & \sum_{wijt} x_{1wijt} 2tp_{ij} ecoPA_{M2ij} + \sum_{wjkt} x_{2wjkt} 2tp_{jk} ecoAM_{M2jk} + \\ & \sum_{w,j,jj,t} x_{3w,j,jj,t} 2taa_{j,jj} ecoAA_{M2j,jj} + \sum_{wik} x_{4wik} 2tpm_{ik} ecoPM_{M2ik} \end{aligned} \right) \quad (4.4s)$$

O indicador social está relacionado a renda obtida da venda dos produtos que é intermediada por uma cooperativa de produtores que compartilham o valor da venda, conforme mostram as equações (4.4t e 4.4u), onde:  $tx$  representa a taxa de atratividade anual (12%),  $TXINF_t$  equivale a uma taxa de inflação anual (5%),  $VVenda_{kw}$  corresponde ao valor de venda por quilograma de produto.

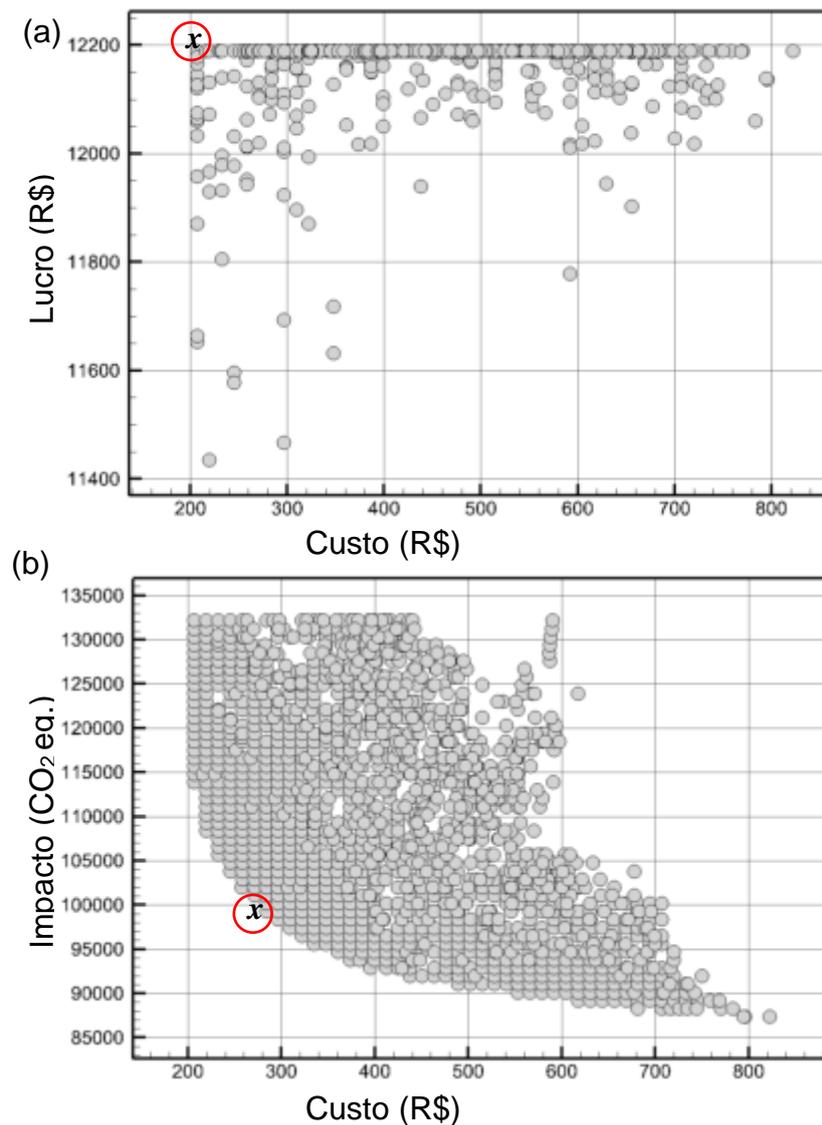
$$lucro(f_1) = \sum_t lucperiod_t \quad (4.4t)$$

$$lucperiod_t = \left( \frac{1}{((1+tx)^{tmp_t-1})} \sum_{wjk} x_{2,wjk} VVenda_{kw} TXINF_t - cost_t \right) \quad (4.4u)$$

As equações (4.4<sub>a-u</sub>) foram resolvidas em GAMS, usando como solucionador o solver CPLEX 12.1. A solução para este problema se deu em um conjunto de alternativas de Pareto, que apresentam a melhor troca entre os três objetivos. Nesse trabalho, essas soluções de Pareto foram determinadas através do método  $\varepsilon$ -restrição.

#### 4.2.4 Resultados (etapas 4)

Considerando então os três objetivos descritos, foram obtidas pelo método  $\varepsilon$ -restrição as fronteiras de Pareto associadas, as quais foram plotadas em um gráfico 3-D como mostrado na Figura 4.4c. Os objetivos também foram apresentados dois a dois em gráficos bidimensionais como mostrado na Figura 4.4b (perspectivas a b e c) para facilitar a visualização.



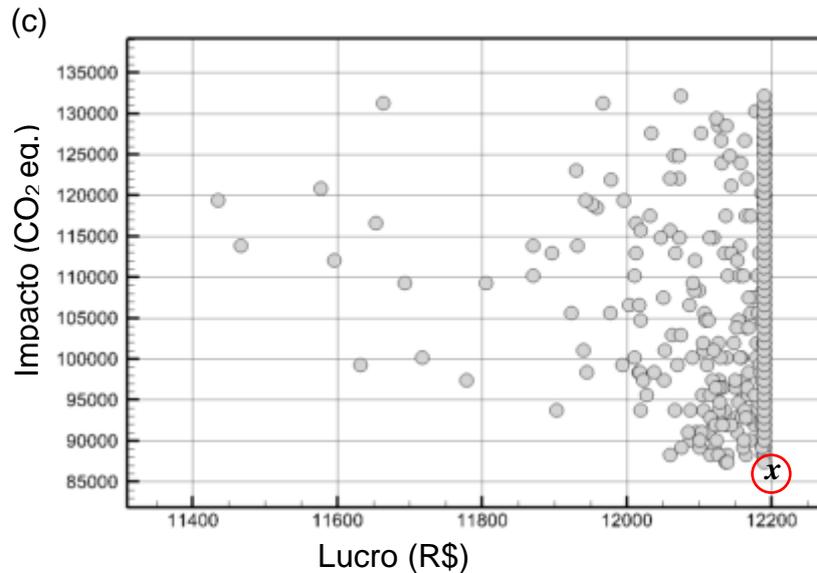


Figura 4.4b: Os gráficos (a), (b) e (c) apresentam uma fronteira de Pareto que mostra a relação de trocas entre dois dos três objetivos.

Observando o plano de corte da Figura 4.4b (a), o menor custo e o maior lucro podem ser observados na região do primeiro quadrante, ponto  $x$ , parte superior do gráfico, com custo de aproximadamente R\$ 200,00 e lucro de R\$ 12.200,00. Nesse ponto, o mínimo custo é conseguido otimizando os parâmetros adotados para o transporte dos produtores até os mercados, já o máximo lucro está associado ao preço de venda, bem como a taxa de atratividade daquilo que é produzido ao longo do tempo. Analogamente na Figura 4.4b (b), o menor custo está associado ao menor impacto ambiental na região do gráfico do ponto de joelho  $x$ , circulada em vermelho, com custo em torno de R\$ 300,00 e impacto de aproximadamente 9.800 CO<sub>2</sub> eq. Neste ponto vale observar que, para que o impacto ambiental diminua um pouco, o custo irá aumentar demasiadamente. No ambiente natural, isso ocorre quando investe em novas tecnologias para melhorias no processo. Finalmente na Figura 4.4b (c) é possível observar um máximo lucro de R\$ 12.200,00 com um impacto mínimo de 8.700 de CO<sub>2</sub> eq. no ponto  $x$ . Todavia, o tomador de decisão deve estar atento na gestão sustentável da cadeia de suprimentos para buscar pontos de equilíbrio, uma vez que para algumas das soluções encontradas para essa rede, a busca pelo máximo lucro pode levar a um aumento significativo dos impactos ambientais.

Depois de examinar dois dos objetivos separadamente os resultados para o problema de otimização multiobjetivo são observados no gráfico tridimensional como uma frente de Pareto tridimensional, conforme mostra o diagrama na figura (4.4c).

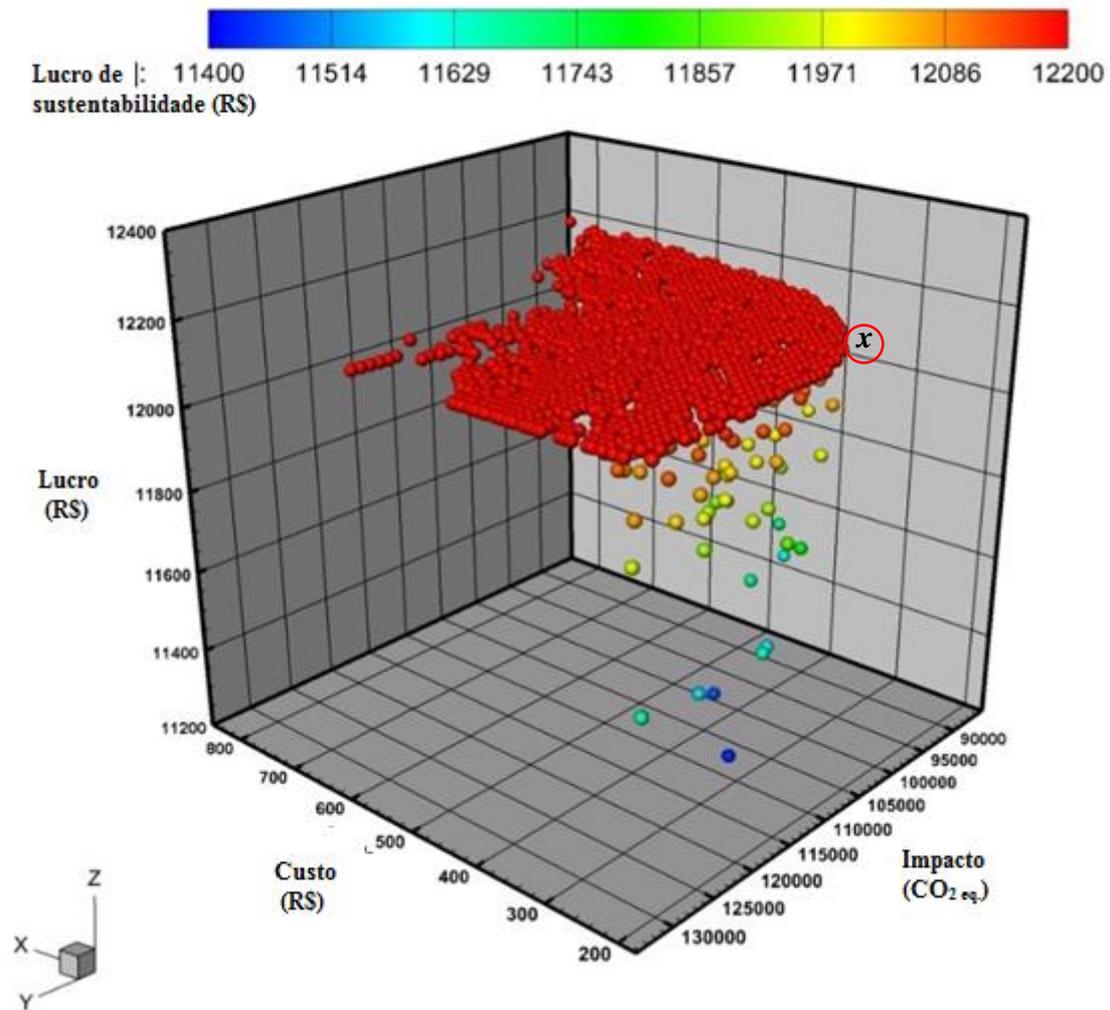


Figura 4.4c: O diagrama mostra soluções ótimas de Pareto com respeito a todos os três objetivos (social, ambiental e econômico).

A Figura 4.4c ilustra a relação de compromisso entre os três objetivos. Porém, como observado acima na análise dos planos de corte, a região do ponto de joelho da figura, circulado em vermelho, representa a região de menor custo, menor impacto ambiental e maior lucro. Pode-se determinar que um ponto de menor custo, menor impacto e maior lucro é: R\$ 300,00, R\$ 12.200,00 e 9.800 CO<sub>2</sub> eq. respectivamente. Como se vê, há uma clara troca entre o indicador econômico, social, e ambiental, uma vez que máximo lucro só pode ser alcançado por comprometer o custo e o impacto ambiental. Note-se que cada ponto de Pareto definido na Fig. 4.4c implica uma estrutura de CS específica e um conjunto de decisões de planejamento possíveis.

De acordo com o conceito de dominância de Pareto, alguns pontos encontrados para o caso (pontos indicados na figura 4.4c nas cores azul, verde e amarelo) não pertencem ao conjunto ótimo de Pareto para esse caso. Assim, na Figura 4.4d, os valores ótimos de  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$

que pertencem ao conjunto de Pareto foram distribuídos em gráfico 3D nos eixos coordenados x, y e z, respectivamente, sendo que esses valores foram utilizados para avaliação econômica, ambiental e social do sistema. Nota-se que as configurações da CS nas soluções extremas (máximo lucro esperado) implicam num alto do impacto ambiental.

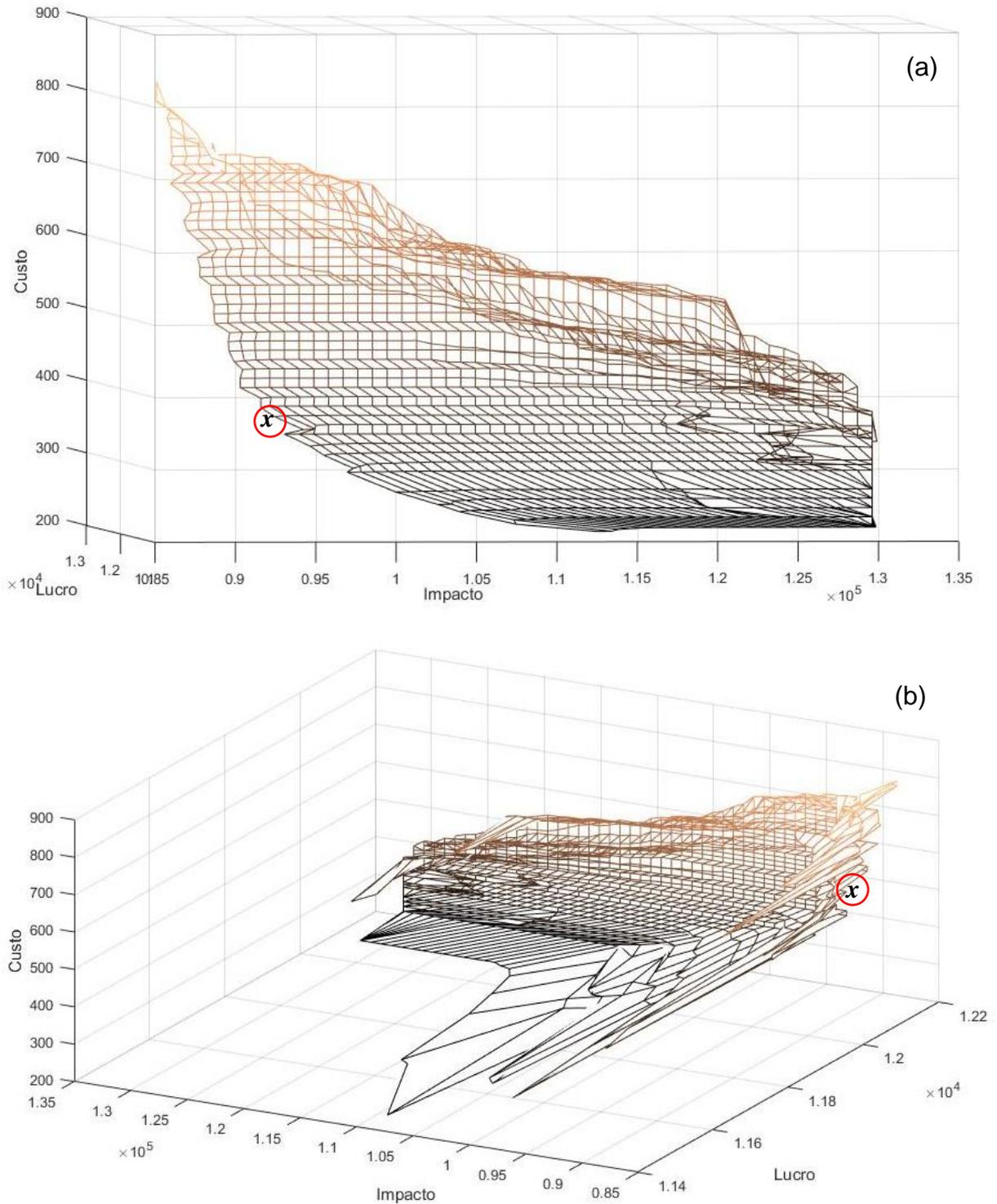


Figura 4.4d: Conjunto de soluções para avaliação social, econômica e ambiental.

(a) Perspectiva 1. (b) Perspectiva 2.

As Figuras 4.4d, (a) e (b), foram construídas em Matlab e mostra o perfil da análise tridimensional dos objetivos em estudo. Pode-se perceber na perspectiva 1, em (a), que os objetivos custo e impacto delimitam a fronteira de Pareto com soluções dominantes dispersas ao longo do eixo da terceira variável, o lucro. Assim, foi possível a confirmação de um comportamento onde o custo diminui em soluções ótimas de alto impacto ambiental na região onde o lucro obtido foi maior. Observou-se na Perspectiva 2, em (b), a presença de soluções ótimas com maiores valores do objetivo lucro apenas na região de menor custo, uma vez que a ordem dada ao solver foi a maximização do lucro tendo o custo e os impactos ambientais restrições do problema. É importante salientar que o modelo matemático desenvolvido permitiu a expansão da rede incorporando outro produto além do tomate, no caso a alface. Isso demonstra, portanto, que o quadro otimização proposto pode ser utilizado para resolver problemas da cadeia de suprimentos mais produtos da hortifruticultura.

#### **4.4.5. Conclusão (etapa 5)**

Os três objetivos (econômico, ambiental e social) foram resolvidos em GAMS pela aplicação do método  $\varepsilon$ -restrição gerando soluções. As fronteiras de Pareto associadas, foram plotadas em um gráfico 3-D. O gráfico ilustra uma clara relação de compromisso entre os três objetivos. A melhor solução praticável (MSP) para o modelo, estimada por meio da proximidade com o “ponto de joelho”, representa a região de menor custo, menor impacto ambiental e maior lucro de sustentabilidade para essa rede. Entretanto, pode-se determinar que um ponto de menor custo, menor impacto e maior lucro é: R\$ 300,00, R\$ 12.200,00 e 9.800 CO<sub>2</sub> eq., respectivamente.

As soluções obtidas pela abordagem proposta fornecem informações valiosas sobre o problema de desempenho da CS estudada, e destinam-se a orientar os tomadores de decisão para a adoção de alternativas de processos mais sustentáveis. A abordagem apresentada nesse trabalho propõe a maximização do objetivo lucro de sustentabilidade esperado, satisfazendo ao mesmo tempo o objetivo menor custo e o objetivo menor impacto ambiental. Assim, para a cadeia de suprimentos estudada, a estratégia da determinação da fronteira de Pareto tridimensional possibilitou uma boa visualização do comportamento da rede de CS, favorecendo a observação das melhores soluções praticáveis do problema, contribuindo para a gestão da sustentabilidade. Vale destacar ainda que esse modelo foi desenvolvido para propiciar que tudo o que é produzido pelos pequenos produtores chegue aos armazéns e mercados.

---

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES GERAIS:

#### **Principais Contribuições e Sugestões**

---

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, incluindo as principais contribuições provenientes do desenvolvimento de cada modelo em particular, assim como sugestões para trabalhos futuros.

#### 5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

A revisão da literatura sugere que existe uma grande demanda pelo desenvolvimento de estudos que envolvam as métricas de ACV em conjunto com técnicas de programação matemática para modificar ou desenvolver um sistema a fim de diminuir seus impactos ambientais. As pesquisas nessa área são tratadas como fonte importante de informações com abrangência nas tomadas de decisões ambientalmente conscientes, especialmente por órgãos fiscalizadores, produtores e consumidores, auxiliando ainda na escolha de produtos sustentáveis e processos de produção mais limpos. Cabe ao gestor responsável por cada setor da cadeia produtiva, utilizar técnicas operacionais disponíveis e recomendadas, objetivando a otimização de seus custos, a minimização de impactos ambientais e a maximização de ganhos sociais. Observa-se, nos dias atuais, uma maior concentração de estudos e pesquisas de ACV na etapa de cultivo quando se trata de produtos da hortifruticultura, enquanto as etapas de transporte e armazenamento são pouco estudadas. Portanto, existe um grande potencial para o desenvolvimento de estudos nessas etapas com vistas a otimização sustentável. Além disso, de acordo com as literaturas estudadas, existe no setor da cadeia de suprimentos de frutas e verduras uma grande preocupação com relação à emissão de gases de efeito estufa (GEE) e sua potencial relação com as mudanças climáticas.

Nesta tese, quatro variações do modelo de transporte com base em programação matemática foram propostas no Capítulo 4 para resolver problemas relacionados com a gestão

sustentável da cadeia de suprimentos de produtos da hortifruticultura. No nível 4.1 um modelo de PL foi desenvolvido para auxiliar em uma avaliação ambiental e econômica da CS, especialmente da fase de transporte de tomates. O modelo foi implementado em GAMS e o conjunto de equações foi resolvido usando o solucionador CPLEX 12.1. A proposta de avaliação ambiental e econômica desse modelo levou ao estudo de três configurações existentes da CS, onde se aplica a variação no número de armazéns (0,1 e 2) que recebem os produtos (kg de tomate) provenientes dos produtores. Neste contexto, o estudo da fronteira de Pareto resultou em um conjunto contendo "pontos ótimos de Pareto". Como duas das soluções ótimas são qualitativamente equivalentes, pode-se indicar que a melhor configuração de CS obtida considerou apenas um armazém para receber o produto e encaminhar aos mercados. Decidir sobre o cenário com um armazém pode ser uma forma para os produtores terem menores custos de transporte, o que pode levar a um melhor desempenho da CS. Uma contribuição importante desse modelo está na aplicação do quadro proposto para as condições do Brasil.

No nível 4.2 um modelo de PL foi desenvolvido para avaliação de desempenho de diferentes cenários possíveis da CS. Esse modelo desenvolvido propôs a minimização do custo total e a minimização do impacto ambiental total envolvido no transporte de tomate, empregando a otimização multiobjetivo no desempenho da CS buscando soluções equilibradas. O método  $\epsilon$ -restrição foi utilizado para otimização multiobjectivo. O conceito de dinâmica de Pareto foi aplicado a fim de revelar as possíveis trocas entre os objetivos ambiental e econômico. A identificação das melhores soluções praticáveis (MSP) se deu por meio da identificação do chamado "ponto de joelho". Para todos os casos analisados, foram obtidas diferentes soluções ótimas que podem representar a MSP para esse estado particular de operação da CS. Vale lembrar que as melhores opções praticáveis para a gestão da CS dependerão do conhecimento do tomador de decisão e de análise apropriada. É importante destacar que o Caso 5 desse modelo apresenta uma CS que minimiza  $f_1$  e  $f_2$  e pode indicar ao tomador de decisão novas estratégias, como a criação de pontos de transbordo para obter melhorias na CS atribuída. Consoante a isso, foi possível concluir que existem grandes possibilidades de melhorias para gestão sustentável do CS de tomates, uma vez que mudanças na configuração do processo podem se traduzir em minimização de custos e impactos ambientais negativos, bem como melhorias no processo de distribuição de produtos da hortifruticultura.

No nível 4.3 foi desenvolvido um modelo de PL para otimização sustentável da CS utilizando diferentes indicadores de impacto ambiental a fim de determinar uma configuração

para transporte de tomates do campo até os supermercados com mínimos impactos ambientais e mínimo custo possível. Nesse sentido, foi realizada uma otimização sustentável da cadeia de suprimentos de tomates, considerando dois indicadores-chave de desempenho: custo de distribuição e impactos ambientais. Esses indicadores foram otimizados utilizando o método  $\epsilon$ -restrição. Os pontos de joelho novamente foram utilizados como critério para a obtenção das Melhores Soluções Praticáveis para essa rede. Como indicadores de desempenho ambiental, foram incorporados os impactos ambientais da etapa de transporte dos tomates, de acordo com as categorias de impacto da metodologia ReCiPe. A estrutura de otimização multiobjetivo que incorpora esses indicadores de sustentabilidade foi desenvolvida em GAMS e aplicada em dois casos de estudo.

Os resultados mostraram claras relações de trocas entre os objetivos econômico e ambiental. Em particular, as curvas de Pareto formadas apresentam um potencial de minimização na emissão de gases de efeito estufa, bem como redução dos impactos ambientais gerados na CS. Dentre todas as categorias de impacto ambiental analisadas, o indicador de impacto “mudanças climáticas” apresentou o maior impacto total entre todas as categorias de impacto ambiental aqui apresentadas. Isso porque esse sistema foi diretamente influenciado pela liberação de GEE originários do escapamento de veículos automotores durante o transporte de tomates. De fato, existe restrição de processo referente as distâncias a serem percorridas por caminhões de pequeno e médio porte, o que pode influenciar diretamente nas quantidades de impactos gerados nessa cadeia de suprimentos. Também é importante destacar a contribuição do conjunto de dados escolhido para cada categoria de impacto ambiental analisada. Desse modo, a repartição dos impactos indica que a maior contribuição de emissões se mostra na fase de transporte do produtor ao armazém.

Ainda, com relação a repartição de impactos por categoria, os resultados mostraram que para os casos C1 e C2, os efeitos das emissões de gases do efeito estufa durante a distribuição de tomates foram notáveis principalmente na categoria mudanças climáticas. O método de otimização utilizado nesse trabalho pode auxiliar no encontro de soluções ideais para o problema, podendo levar a um ótimo desempenho global da CS. Além disso, a otimização sustentável pode auxiliar no objetivo de redução dos impactos ambientais do sistema, a partir do estudo das soluções encontradas para o modelo. As soluções de Pareto formadas pela observação dos “pontos de joelho” descrevem os potenciais pontos mais equilibrados entre o objetivo econômico e o ambiental. Contudo, isso também dependerá do tomador de decisão responsável pela gestão sustentável da CS.

No nível 4.4 foi desenvolvido um modelo de PLIM para gestão da sustentabilidade da cadeia de suprimentos utilizando os indicadores: ambiental, econômico e social. O problema abordado neste trabalho buscou determinar uma configuração de CS para o transporte de tomates e alface com mínimos impactos, mínimos custos e máximo lucro possível. O conjunto de equações apresentadas foram resolvidos em GAMS usando como solucionador o solver CPLEX 12.1. O objetivo impacto ambiental – mudanças climáticas, que foi selecionado de acordo com a metodologia ReCiPe para ACV, também foi utilizado. Como indicador econômico foi utilizado o custo de distribuição e como indicador social foi utilizado o “lucro de sustentabilidade”, que está ligado a melhoria na renda principalmente dos produtores rurais. Considerando então os três objetivos descritos, foram obtidas pelo método  $\varepsilon$ -restrição as fronteiras de Pareto associadas, as quais foram plotadas em um gráfico 3-D. O gráfico ilustra uma clara relação de compromisso entre os três objetivos. A melhor solução praticável (MSP) para o modelo, estimada por meio da proximidade com o “ponto de joelho”, representa a região de menor custo, menor impacto ambiental e maior lucro para essa rede. As soluções obtidas pela abordagem proposta forneceram informações valiosas sobre o problema de desempenho da CS estudada, podendo servir de auxílio aos tomadores de decisão para a adoção de alternativas de processos mais sustentáveis. Portanto, a abordagem apresentada nesse trabalho propõe maximização do objetivo lucro de sustentabilidade, satisfazendo ao mesmo tempo, de maneira equilibrada o objetivo custo e o objetivo impacto ambiental.

Como considerações finais, enfatiza-se que os pequenos produtores rurais são os maiores colaboradores para produção de frutas e verduras em nível de Brasil, sendo essa atividade fonte de renda para muitas famílias, gerando, portanto, benefícios sociais. Todavia o conjunto de impactos ambientais provenientes da etapa de transporte do produto da hortifruticultura se mostra significativo. Em se tratando da CS de tomates não foram identificados até então, estudos de OMO que mostrassem as interações entre objetivos ambientais e econômicos na etapa de transporte através das soluções de Pareto, com aplicação no contexto brasileiro. É importante destacar que a CS de tomates não é a única que pode ser otimizada por meio dos modelos matemáticos sustentáveis, ou seja, o modelo matemático desenvolvido nessa tese pode ser expandido para outras cadeias, a exemplo da alface. Outra importante contribuição dessa pesquisa, foi a expansão do modelo que permitiu a incorporação de um novo objetivo sustentável, o lucro de sustentabilidade. Fazendo uma análise qualitativa, o objetivo social está diretamente relacionado à melhoria na renda principalmente dos pequenos produtores rurais e, numa perspectiva mais ampla se sustenta nos três pilares da sustentabilidade: econômico, ambiental e social.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A continuação do presente trabalho poderá ser realizada através das seguintes sugestões:

- Análise de incerteza associada aos dados, de tal forma que aqueles que venham a utilizar os resultados possam avaliar a sua confiabilidade;
- Análise de sensibilidade e flexibilidade a fim de atestar a viabilidade do modelo desenvolvido, importante para tomada de decisão de um gestor;
- Incorporação de outros indicadores sociais ao modelo para gestão da sustentabilidade na CS, combinando métricas de avaliação de ciclo de vida e minimização simultânea de custos e impactos ambientais.
- Inserir e estudar o comportamento da variável tempo nos modelos de gestão de cadeias de suprimentos sustentáveis.
- Expandir o modelo para outros produtos da hortifruticultura, podendo fazer comparações relativas aos impactos gerados por tipo de produto.

---

## REFERÊNCIAS

---

AIRES, T.A. **Estudo para aproveitamento de resíduos orgânicos provenientes de supermercados para processo de compostagem.** In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE VALE DO RIO VERDE (UninCor), v. 1, 2011.

ALBRECHT et al. An extended life cycle analysis of packaging systems for fruit and vegetable transport in Europe. **Int. J. Life Cycle**, v. 18, p. 1549-1567, 2013.

ANFAVEA – Associação Nacional de Veículos Automotores. Tabela de emissões ciclo Otto. 2015.

ASHBY, A.; LEAT, M.; HUDSON-SMITH, M. Making connections: a review of supply chain management and sustainability literature. **Supply Chain Management: An International Journal**. v.17, p. 497–516, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações.** Brasil, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.** Brasil, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14001: Gestão Ambiental.** Brasil, 2015.

AZAPAGIC, A.; CLIFT, R. Linear programming as a tool in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 3, n. 6, p. 305-316, 1998.

BARBIERI, J.C.; SOUSA FILHO; J.M., BRANDÃO, C.N.; DI SERIO, L.C.; REYES JUNIOR, E. Gestão verde da cadeia de suprimentos: análise da produção acadêmica brasileira. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.14, p. 1104-1128, 2014.

BCB – Brazilian Central Bank, 2015 - Banco Central do Brasil. Exchange rate. <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpsq.asp?id=txcotacao> (accessed 03.13.2017).

BACKER, E.; AERTSENS, J.; VERGUCHT, S.; STEURBAUT, W. Assessing the ecological soundness of organic and conventional agriculture by means of life cycle assessment (LCA): A case study of leek production. **Br. Food J**, v. 111, p. 1028-1061, 2009.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 01/86** (EIA/RIMA). Brasília, DF, 1986.

BRASIL. **Constituição (1988)**. Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988. Brasília, DF, 1988.

BRASIL. Lei n. 12305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, 2012.

- BRANDENBURG et al. Modelos quantitativos para gerenciamento sustentável da cadeia de suprimentos: desenvolvimentos e direções. **European Journal of Operational Research**, v. 233, p. 299-312, 2014.
- BAZARAA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear programming and network flows**, 4th ed. New York: John Wiley, 2010.
- BEANLANDS, G. **Scoping methods and baseline studies in EIA**. In: WATHERN, P. (org). Avaliação de Impacto Ambiental: situação atual e perspectivas. São Paulo: Epusp, 1993. p. 59-65.
- BERGER, R. Minimização do custo de transporte de Madeira de eucalipto no estado de São Paulo. Piracicaba, 1975. 122p. Dissertação (M.S.) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- CALDEIRA-PÍRIS, A. Uso potencial da análise do ciclo de vida (acv) associada aos conceitos da produção orgânica aplicados à agricultura familiar. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v.19, p.149-178, 2002.
- CAMILO, L; RAVAGNANI, M. A. S. S. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de produtos da horticultura: Estado da Arte**. Em Anais do IV Congresso Brasileiro de Gestão pelo Ciclo de Vida. São Bernardo do Campo: 2014.
- CAMILO, et al. **Sustainable optimization of tomato supply chain in a region of Paraná state - Brazil.**, Energy for Sustainability International Conference. Designing Cities & Communities for the Future. Funchal, 8-10, 2017.
- CARRERAS, J. et al. Systematic approach for the life cycle multi-objective optimization of buildings combining objective reduction and surrogate modeling. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 506-518, 2016.
- CHANKONG, V., HAIMES Y.Y. **Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology**. North-Holland. New York, 1983.
- CERUTTI, A. K; BECCARO, G. L; BRUUN, S.; BOSCO, S.; DONNO, D.; NOTARNICOLA, B.; BOUNOUS, G. Life cycle assessment application in the fruit sector: state of the art and recommendations for environmental declarations of fruit products. **J. Clean. Prod.**, v. 73, p. 125-135, 2014.
- CHANG, M. A scenario-based mixed integer linear programming model for composite power system expansion planning with greenhouse gas emission controls. **Clean Techn Environ Policy**, v. 16, p. 1001-1014, 2014.
- CHEN, C. L. e LEE, W. C. Multi-objective optimization of multi echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices. **Comput. Chem. Eng.**, v. 28, p. 1131-1144, 2004.
- CHEN, H.; WEN, Y.; WATERS, M. D.; SHONNARD, D. R. Design guidance for chemical processes using environmental and economic assessments. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 41, p. 4503-4513, 2002.

DANTZIG, G. B. **Linear Programming and Extensions**. Princeton U. Press: 1963.

DAVIES, G. F; MAN, C.M.D.; ANDREWS S.D.; PAURINE, A.; HUTCHINS, M.G.; MAIDMENT, G.G. Potential life cycle carbon savings with low emissivity packaging for refrigerated food on display. **Journal of food engineering**, v. 109, p. 202-208, 2012.

DEB, K.; GUPTA, S. Understanding knee points in bicriteria problems and their implications as preferred solution principles. **Engineering Optimization**, v.43, p. 1175-1204, 2010.

DIAS, R. **Gestão Ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade**. 3º edição. São Paulo: Atlas, 2017.

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. First edition March 2010. Traduzido por Luiz Marcos Vasconcelos. EUR 24708EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union: 2010.

EHRGOTT, M. **Multicriteria Optimization**. New Zealand: Springer, 2005.

EHRGOTT, M; RUZIKA, S. Improved  $\epsilon$ -Constraint Method for Multiobjective Programming. **J Optim Theory Appl**, v. 138, p. 375-396, 2008.

EICKER, M. O. de; HISCHIER, R; KULAY, L. A; LEHMANN, M; ZAH, R. HURNI, H. The applicability of non-local LCI data for LCA. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 30, p. 192-199, 2010.

ESKANDARPOUR, M. et al. **Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review**. *Omega*, v. 54, p. 11-32, 2015.

FELLOWS, P.J. **Tecnologias do processamento de alimentos: Princípios e prática**. Porto Alegre: Artmed, 2006.

FERRÃO, P.C. **Introdução à Gestão Ambiental: a avaliação do ciclo de vida de produtos**. IST Press, 1998.

FLOUDAS, C. A. **Nonlinear and mixed-integer optimization**. New York: Oxford University Press, 1995.

GARNETT T. **Fruit and vegetables and greenhouse gas emissions: exploring the relationship**. Working paper produced as part of the work of the Food Climate Research Network. Centre for Environmental Strategy, University of Surrey, 2006.

GEBRESLASSIE, B. H; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G; JIMÉNEZ, L. BOER, D. Design of environmentally conscious absorption cooling systems via multi-objective optimization and life cycle assessment. **Applied Energy**, v. 86, p. 1712-1722, 2009.

GIRGENTI, V; PEANO, C.; BOUNOUS, M.; BAUDINO, C. A life cycle assessment of non-renewable energy use and greenhouse gas emissions associated with blueberry and raspberry production in northern Italy. **Science of the Total Environment**, v. 458, p. 414-418, 2013.

GOEDKOOPE, et al. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level**. Report 1: Characterisation, 2013.

GOEDKOOPE, M., SPRIENSMA, R. **The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report and annex**. Pré Consultants, Amersfoort, 1999.

GRIPP, V. S. **Análise ambiental, energética e econômica de arranjo processual para reuso da água em refinaria de petróleo**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: USP, 2013.

GROSSMANN, I. E.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. **Computers & Chemical Engineering**, v. 34, p. 1365-1376, 2010.

GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G., CABALLERO, J. A., JIMÉNEZ, L. Application of life cycle assessment to the structural optimization of process flowsheets. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 47, p. 777-789, 2008.

GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G.; GROSSMANN, I. E. Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty. **AIChE Journal**, v. 55, p. 99-121, 2009.

GUNADY, M.G. A. Biswas, W.; Solah, V.A.; James, A.P. Evaluating the global warming potential of the fresh produce supply chain for strawberries, romaine/cos lettuces (*Lactuca sativa*), and button mushrooms (*Agaricus bisporus*) in Western Australia using life cycle assessment (LCA). **Journal of cleaner production**, v. 28, p. 81-87, 2012.

GUINÉE, J. **Handbook on Life Cycle Assessment - Operational guide to the ISO Standards**. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2004.

HANDLER, R. M. SHONNARD, D. R. LAUTALA, P. ABBAS, D. SRIVASTAVA, A. Environmental impacts of roundwood supply chain options in Michigan: life-cycle assessment of harvest and transport stages. **Journal of Cleaner Production**, v.76, p. 64-73, 2014.

HITCHCOCK, B. F. L. The distribution of product from several sources to numerous localities. **Journal of Mathematical Physics**, v. 20, p. 224-230, 1941.

HOFFMANN, V. H.; HUNGERBÜHLER, K.; MCRAE, G.J. Multi-objective Screening and Evaluation of Chemical Process Technologies. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 40, p. 4513-4524, 2001.

HUIJBREGTS, M.A.J. Human population intake fractions and environmental fate factors of toxic pollutants in life cycle impact assessment. **Chemosphere**, v. 61, p. 1495-1504, 2005.

INGWERSEN, W. W. Life cycle assessment of fresh pineapple from Costa Rica. **Journal of Cleaner Production**, v. 35, p. 152-163, 2012.

IPCC, quarto relatório de avaliação: mudanças climáticas 2007: grupo de trabalho I relatório: a base da ciência física. Genebra: IPCC, 2007.

JIANG Y.; GROSSMANN I. E. Alternative mixed-integer linear programming models of a maritime inventory routing problem. **Computers and Chemical Engineering**, v. 77, p. 147-161, 2015.

KHOSHNEVISAN, B; RAFIEE, S.; MOUSAZADEH, H. Environmental impact assessment of open field and greenhouse strawberry production. **European Journal of Agronomy**, v. 50, p. 29-37, 2013.

KOSTIN, A. et al. A novel rolling horizon strategy for the strategic planning of supply chains: Application to the sugar cane industry of Argentina. **Computers e Chemical Engineering**, v. 35, p. 2540-2563, 2011.

KULAK, M.; GRAVES, A.; CHATTERTON, J. Reducing greenhouse gas emissions with urban agriculture: A Life Cycle Assessment perspective. **Landscape and urban planning**, v. 111, p. 68-78, 2013.

LOURENÇO, J.L; KATZ, I. Study of various indices of losses in handling and transport of greens, vegetables and fruits related to logistics management. **Tékhnē e Lógos**, Botucatu, SP, v.2, 2010.

LUENGO, R.F.A.L; JUNQUEIRA, A.H. Distribuição de Hortaliças Brasil. Circular Técnico: EMBRAPA, 2009.

LUO, X. HU, J; ZHAO, J; ZHANG, B; CHEN, Y. MO, S. Multi-objective optimization for the design and synthesis of utility systems with emission abatement technology concerns. **Applied Energy**, v. 136, p. 1110-1131, 2014.

MARTÍNEZ-BLANCO, J.; MUÑOZ, P.; ANTÓN, A.; RIERADEVALL, J. Assessment of tomato Mediterranean production in open-field and standard multi-tunnel greenhouse, with compost or mineral fertilizers, from an agricultural and environmental standpoint. **J. Clean. Prod.**, v. 19, p. 985-997, 2011.

MAVROTAS, G. Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 213, p. 455-465, 2009.

MELE, F. D.; KOSTIN, A. M.; GUILLEN-GOSÁLBEZ, G.; JIMÉNEZ, L. Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina. **Eng. Chem. Res.**, v.50, p. 939-4958, 2011.

MICHALSKÝ, M.; HOODA, P. S. Greenhouse gas emissions of imported and locally produced fruit and vegetable commodities: A quantitative assessment. **Environmental science e policy**, v. 48, p. 32-43, 2015.

MOURON, P.; SCHOLZ, R.W.; NEMECEK, T; WEBER, O. Life cycle management on Swiss fruit farms: Relating environmental and income indicators for apple-growing. **Ecological economics**, v. 58, p. 561-578, 2006.

MURIITHI, F. K. Land use and land cover (LULC) changes in semi-arid sub-watersheds of Laikipia and athi river basins, Kenya, as influenced by expanding intensive commercial horticulture. Montclair, NJ, NY, 2016.

NOGUEIRA, A.C.L.; SCHMUKLER, A. Os pequenos produtores rurais e a sustentabilidade. Boletim Informações FIPE, 2017.

PALAK, G.; EKŞİOĞLU, S. D.; GEUNES J. Analyzing the impacts of carbon regulatory mechanisms on supplier and mode selection decisions: An application to a biofuel supply chain. **J. Production Economics**, v. 154, p. 198-216, 2014.

PHILIPPI JR, A.; ROMÉRO, M. de A. BRUNA, G.C. **Curso de gestão ambiental**. São Paulo: Manole, 2004.

QUAGLIA, A., SARUP, B., SIN, G., GANI, R. Integrated business and engineering framework for synthesis and design of enterprise-wide processing networks. **Comput. Chem. Eng.**, v. 38, p. 213–223, 2012.

RUIZ, R. et al. Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty. **Chemical Engineering Science**, v. 95, p. 1-11, 2013.

RAVAGNANI, M.A.S.S., CABALLERO, J.A. Optimal heat exchanger network synthesis with the detailed heat transfer equipment design. **Computers & Chemical Engineering**, v. 31, p. 1432-1448, 2007.

RANGAIAH, G. P. Multi-objective Optimization: Techniques and Applications in Chemical Engineering. **Singapura: World Scientific**, 2009.

ROBERTSON, K; GARNHAM, M; SYMES, W. Life cycle carbon footprint of the packaging and transport of New Zealand kiwifruit. **J. Life Cycle Assess**, v.19, p.1693-1704, 2014.

ROY, P. et al. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. **Journal of Food Engineering**, v. 90, p. 1-10, 2009.

SABIO, N; KOSTIN, A; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. JIMÉNEZ, L. Holistic minimization of the life cycle environmental impact of hydrogen infrastructures using multi-objective optimization and principal component analysis. **International journal of hydrogen energy**, v. 37, p. 5385-5405, 2012.

SAER, A; LANSING, S; DAVITT, N.H; GRAVES,R.E. Life cycle assessment of a food waste composting system: environmental impact hotspots. **J Clean Prod.**, v. 52, p. 234-244, 2013.

SAMPAIO, P. R. **Teoria, métodos e aplicações de otimização multiobjetivo**. Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2011.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SANTOYO-CASTELAZO, E.; AZAPAGIC, A. Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. **Journal of Cleaner Production**, v. 80, p. 119-138, 2014.

SALVADOR, C.A. Olericultura – Análise do Conjuntura Agropecuária. SEAB: 2016.

SEO, E.S.M.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: ferramenta gerencial para tomada de decisões. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**. São Paulo, 2006.

SEURING, S.; MULLER, M. From a Literature Review to a Conceptual Framework for Sustainable Supply Chain Management. **Journal Of Cleaner Production**, v. 16, p. 1699-1710, 2008.

SILVA, C. A. DA; ANDREOLI, C. V. Compostagem como alternativa a disposição final dos resíduos sólidos gerados na Ceasa Curitiba/PR. **Espírito Santo do Pinhal**, v. 7, p. 027-040, 2010.

SONG, J.; PARK, H.; LEE, D.; PARK, S. Scheduling of Actual Size Refinery Processes Considering Environmental Impacts with Multiobjective Optimization. **Ind. Eng. Chem.** v. 41, p. 4794-4806, 2002.

SOODE, E; LAMPERT, P; WEBER-BLASCHKE, G; RICHTER, K. Carbon footprints of the horticultural products strawberries, asparagus, roses and orchids in Germany. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 168-179, 2015.

STOESSEL, F.; JURASKE, R.; PFISTER, S.; HELLWEG, S. Life cycle inventory and carbon and water footprint of fruits and vegetables: Application to a Swiss retailer. **Environ. Sci. Technol.**, v. 46, p. 3253-3262, 2012.

SUPPEN, N. **Avaliação do Ciclo de vida: A ISO 14040 na América Latina**. Brasília: Abipti, 2005. cap. 3. p. 89-117, 337 p.

TIMOFIECSYK, F. do R; PAWLOWSKY, U. Minimização de resíduos na indústria de alimentos: revisão. **B. CEPPA**, Curitiba, v. 18, p. 221-236, 2000.

THEURL, M. C; HABERL, H; ERB, K; LINDENTHAL, T. Contrasted greenhouse gas emissions from local versus long-range tomato production. **Agron. Sustain.** v. 34, p. 593-602, 2014.

THOMPSON, M.; ELLIN, R; WILDAVSKY, A. **Cultural Theory**, Westview Print Boulder, 1990.

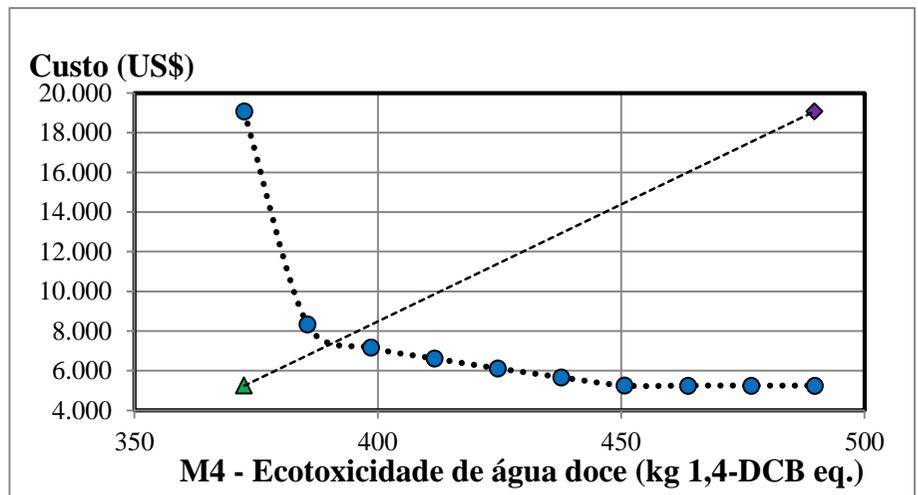
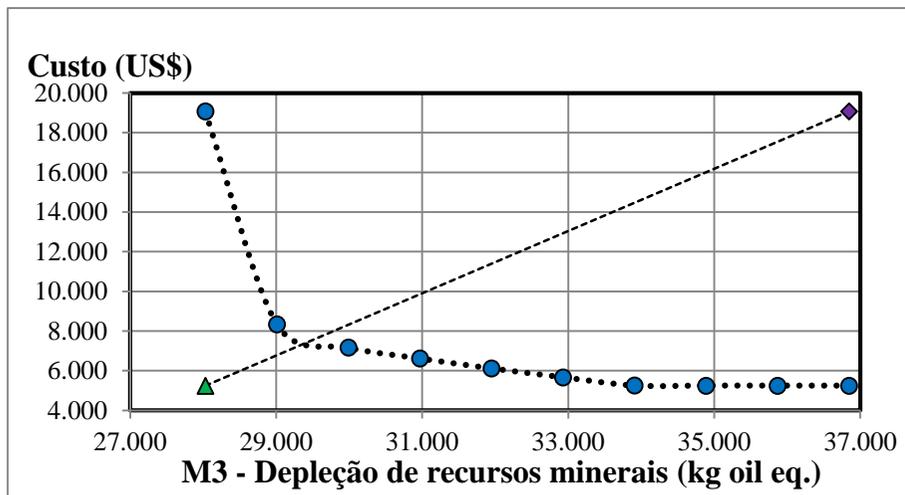
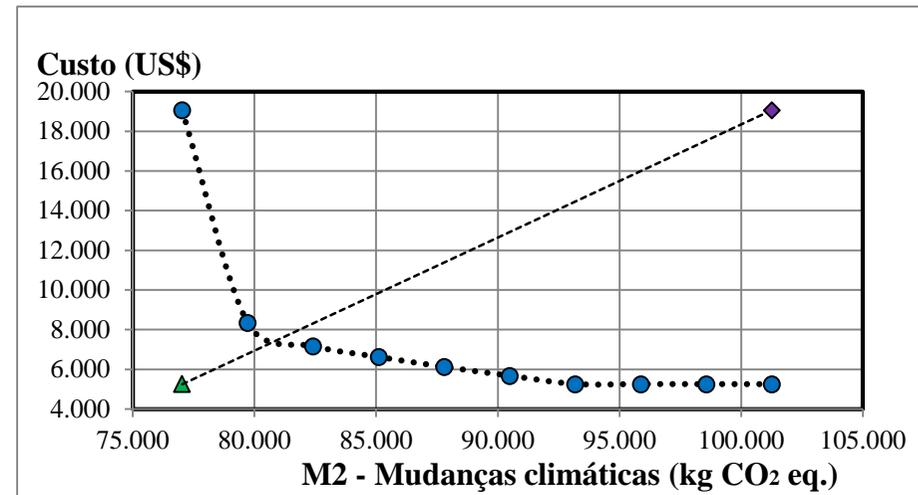
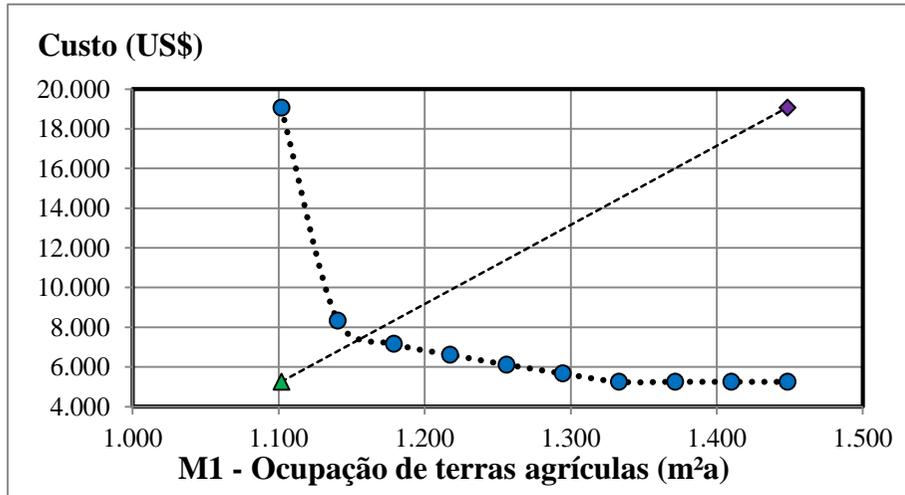
OUATTARA, A. et al. Economic and environmental strategies for process design. **Computers and Chemical Engineering**, v. 36, p. 174-188, 2012.

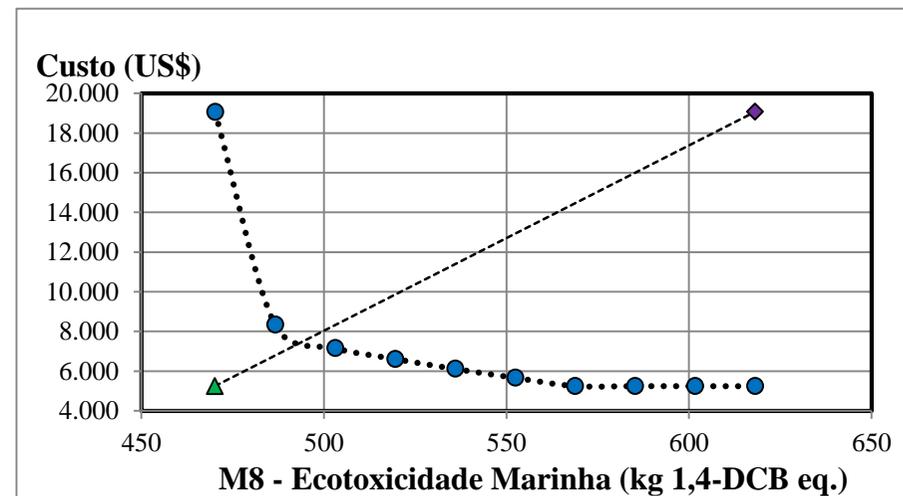
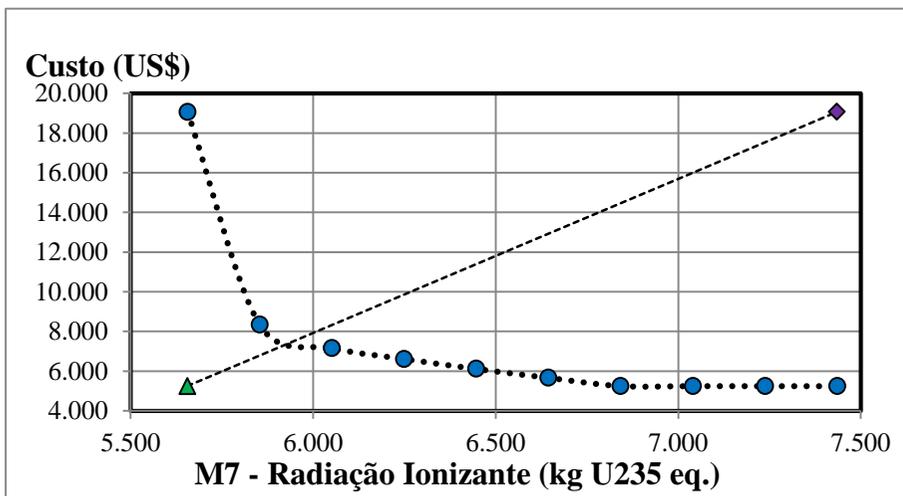
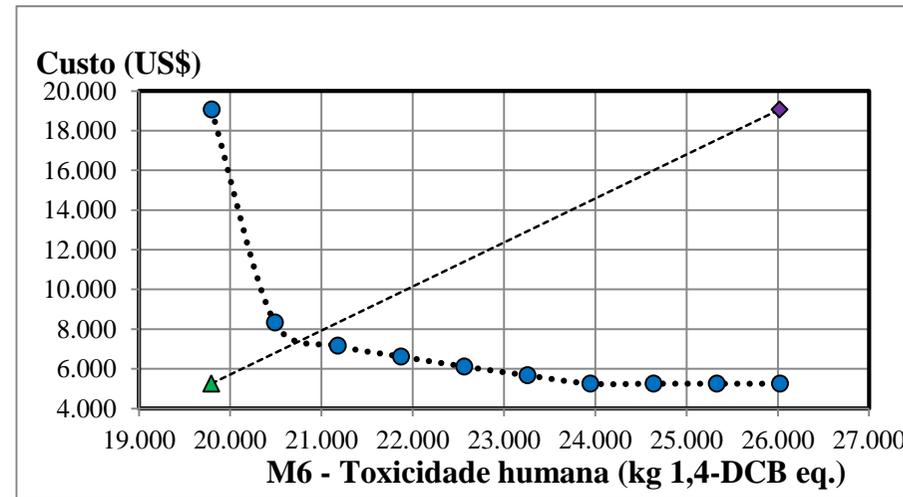
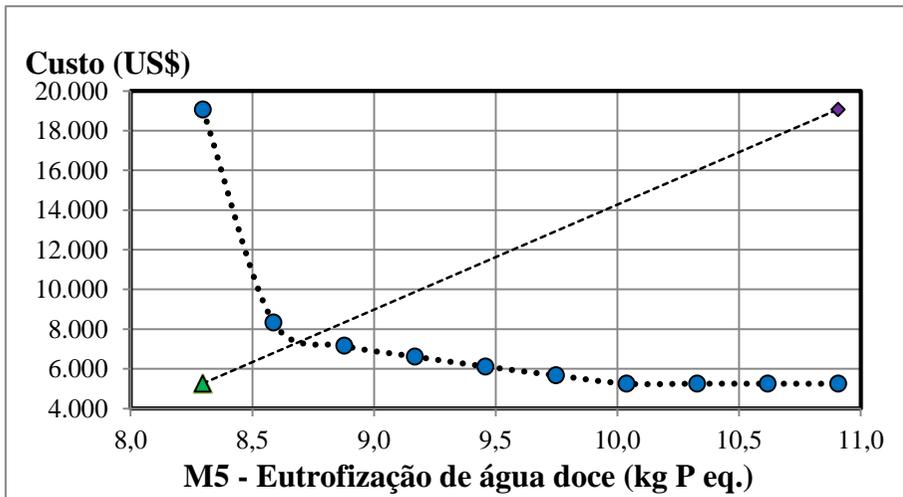
VASKAN, P; GUILLEN-GOSALBEZ, G; JIMENEZ, L. Multi-objective design of heat-exchanger networks considering several life cycle impacts using a rigorous MILP-based dimensionality reduction technique. **Applied Energy**, v. 98, p. 149-161, 2012.

ZHANG, Q.; Shah, N.; Wassick, J.; Helling,R.; Egerschot , V. P. Sustainable supply chain optimisation: An Industrial case study. **Computers & Industrial Engineering**, v.74, p. 68-83, 2014.

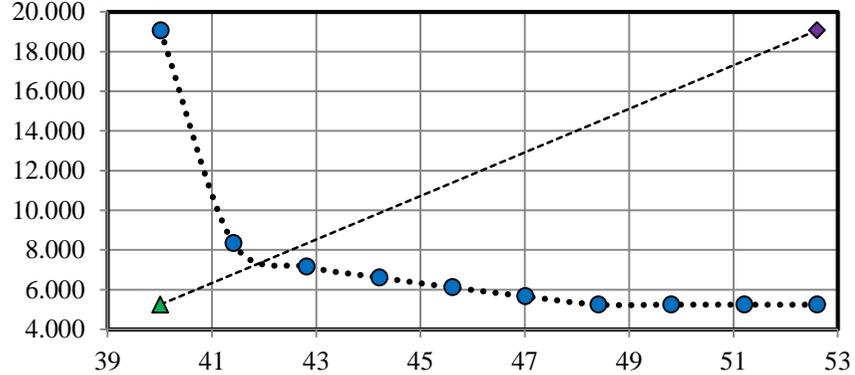
ZORE, Ž.; ČUČEK, L.; KRAVANJA, Z. Syntheses of sustainable supply networks with a new composite criterion – Sustainability profit. **Computers & Chemical Engineering**, v. 102, p. 139-155, 2017.

Anexo A1 – midpont Caso 1



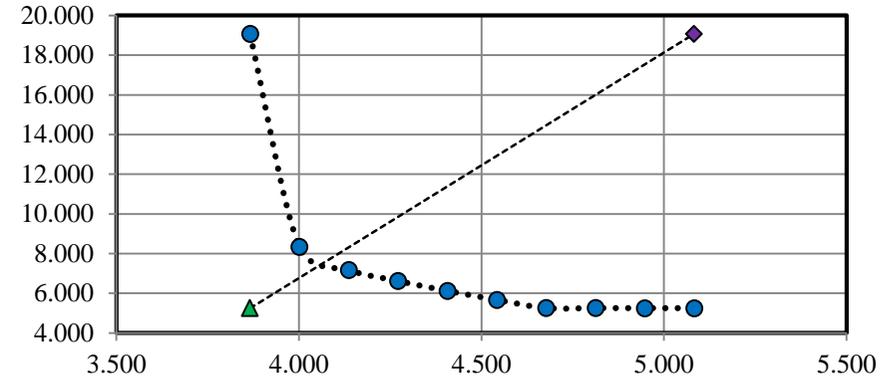


Custo (US\$)



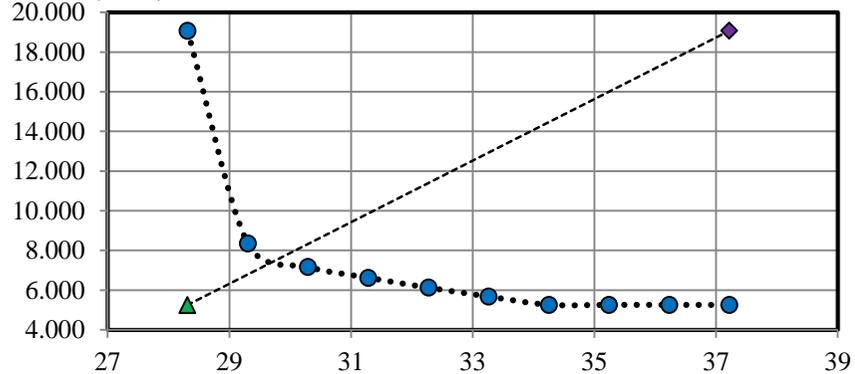
M9 - Eutrofização marinha (kg N eq.)

Custo (US\$)



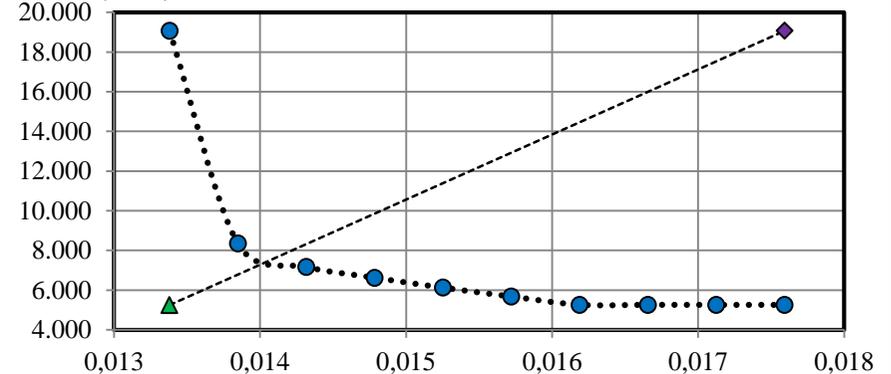
M10 - Depleção de recursos minerais (kg F eq.)

Custo (US\$)

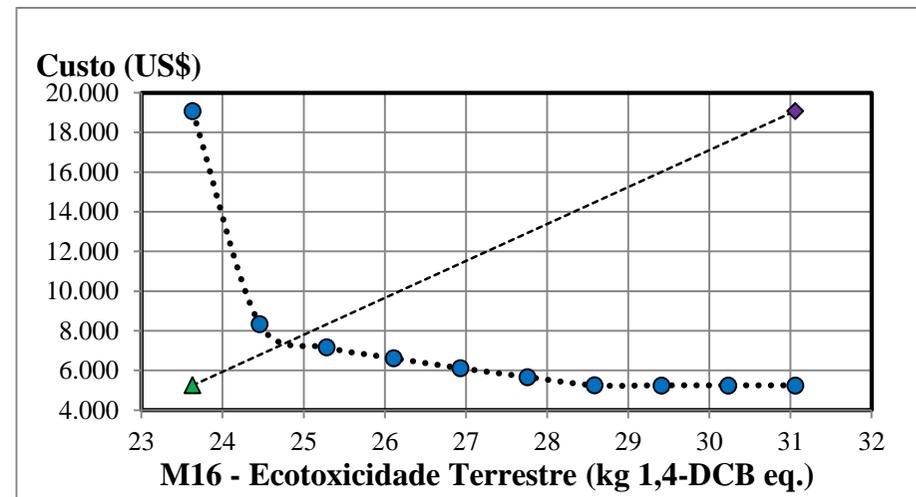
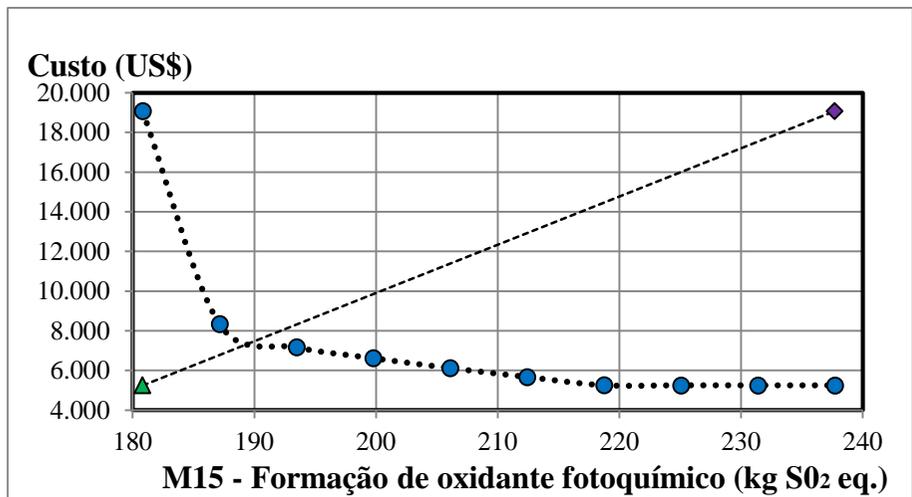
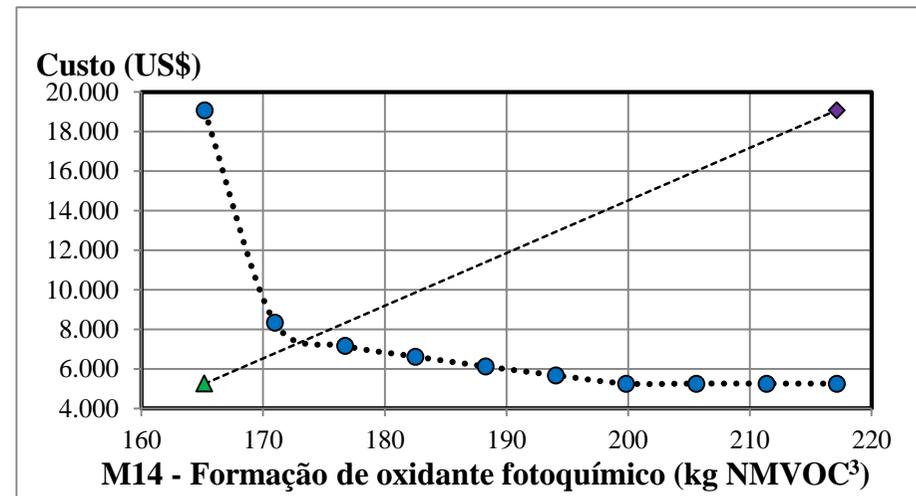
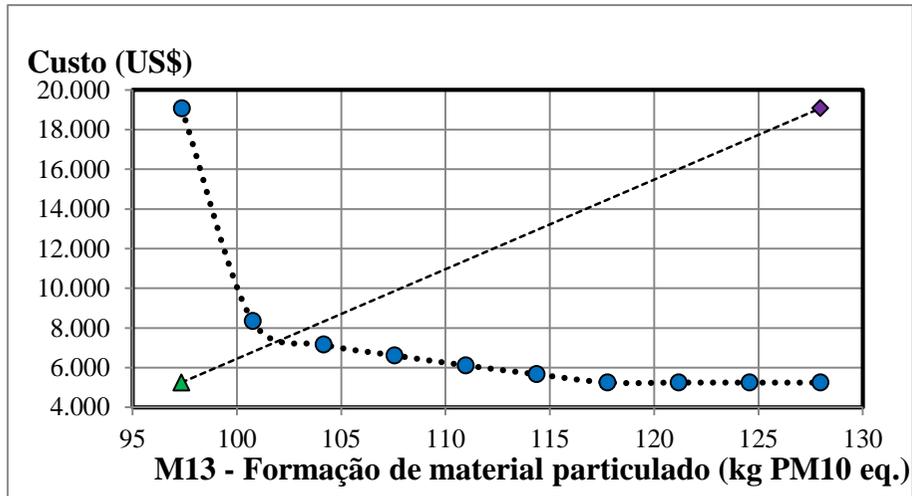


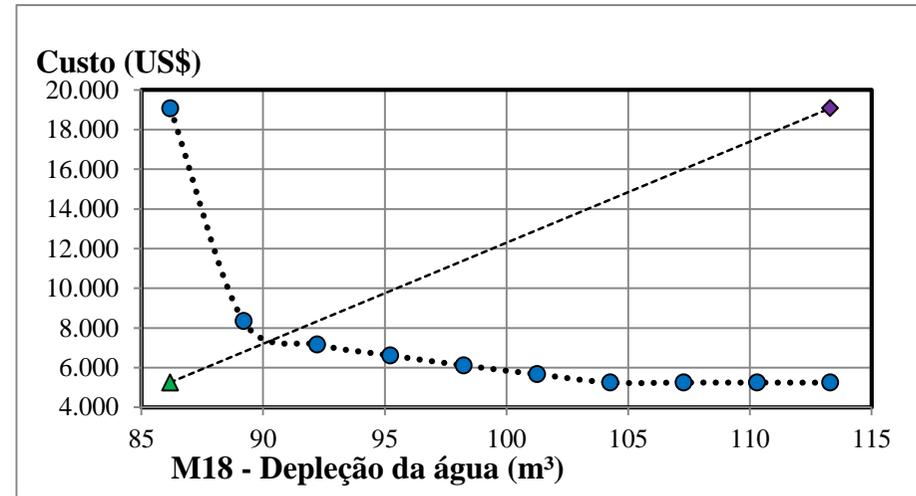
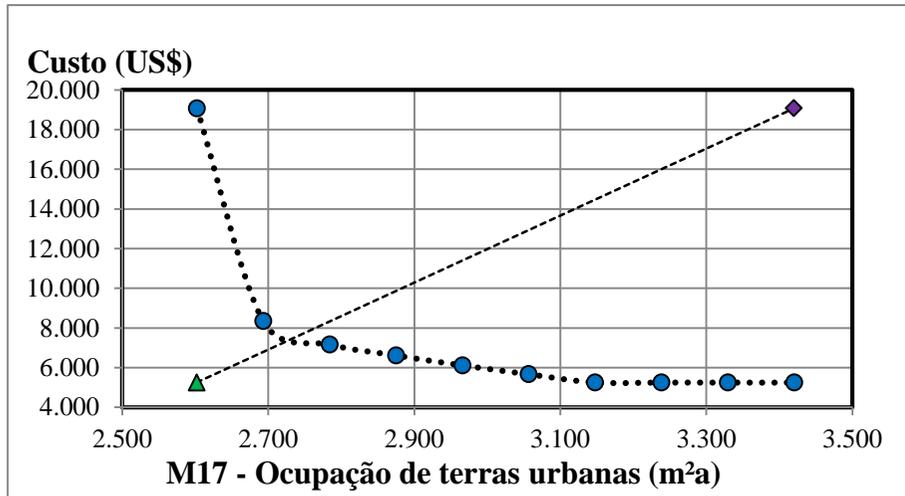
M11 - Transformação de terras virgens (m²a)

Custo (US\$)

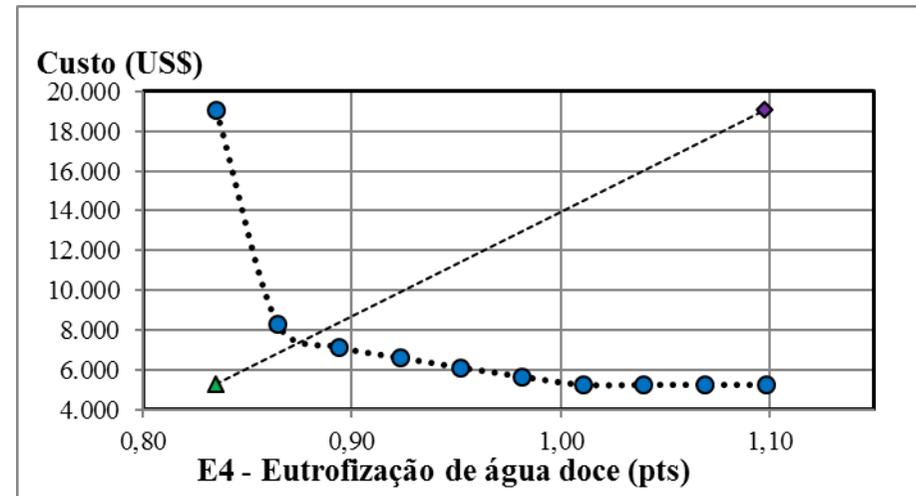
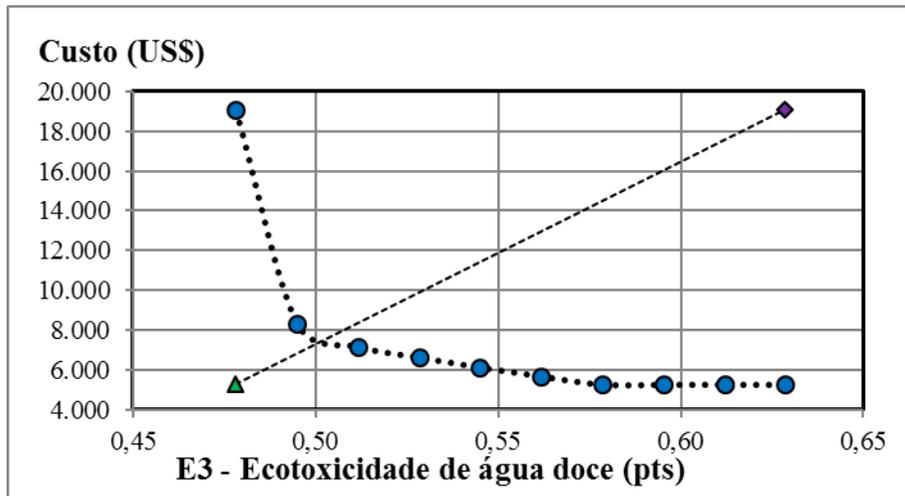
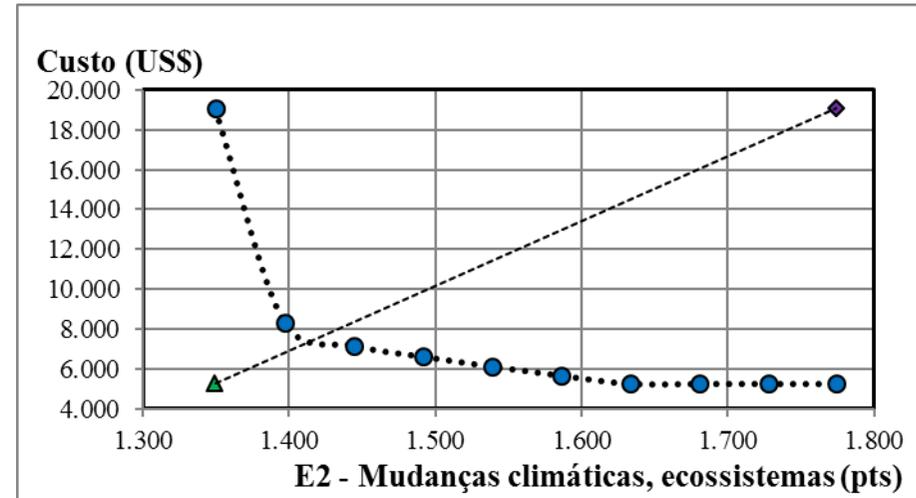
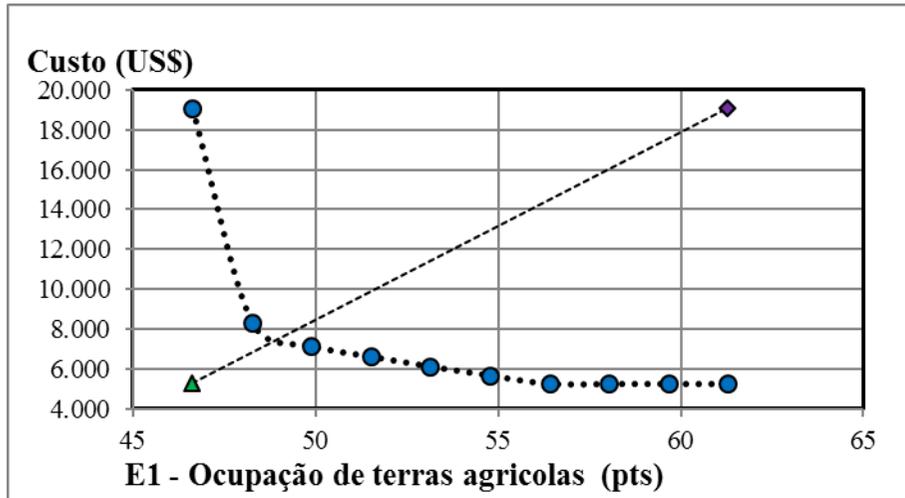


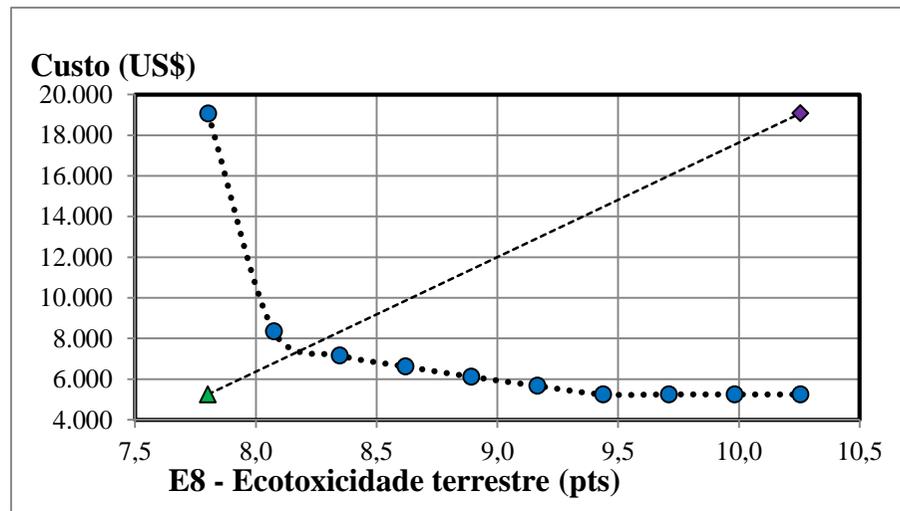
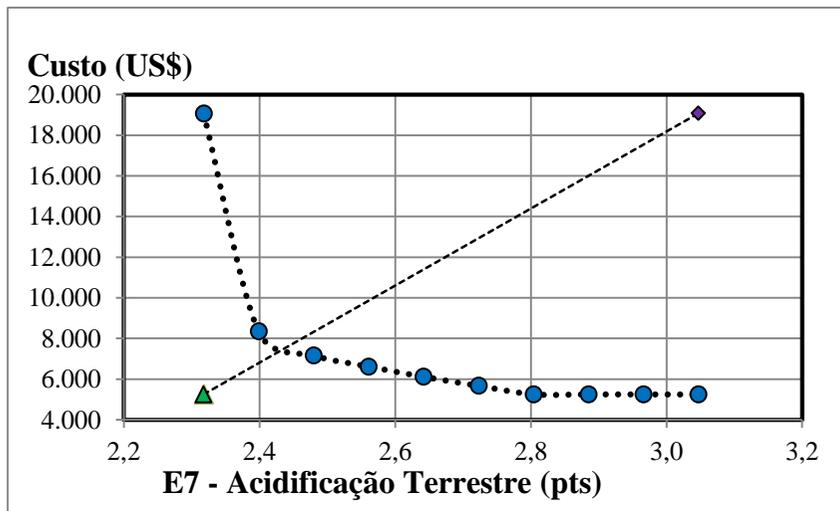
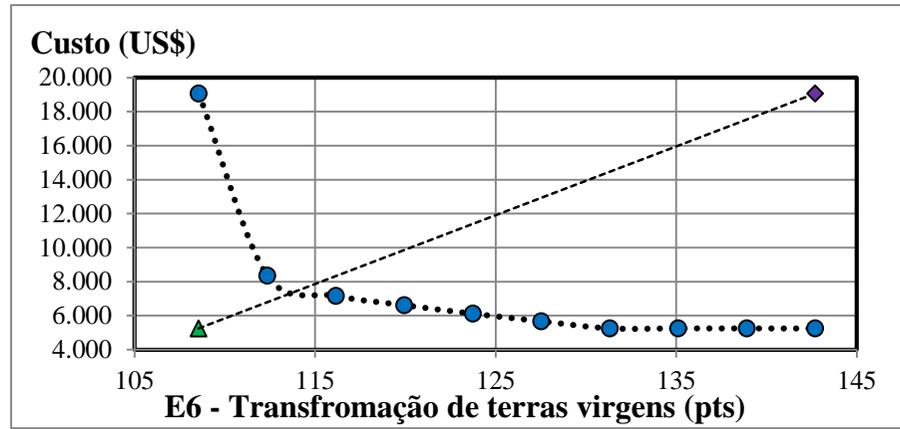
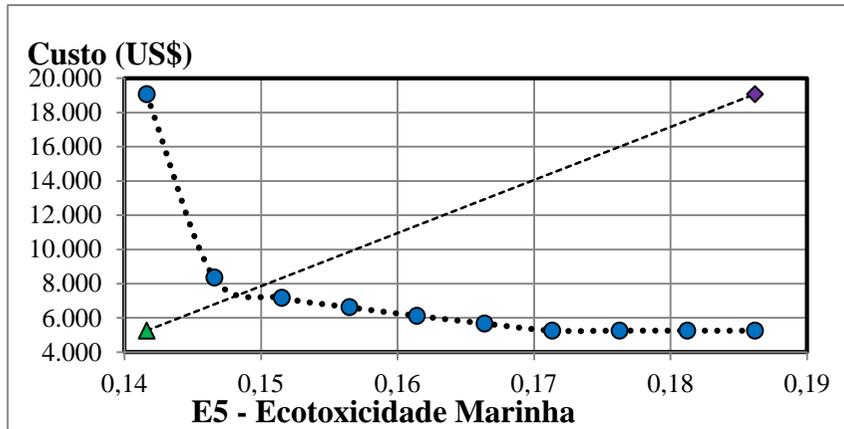
M12 - Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq.)



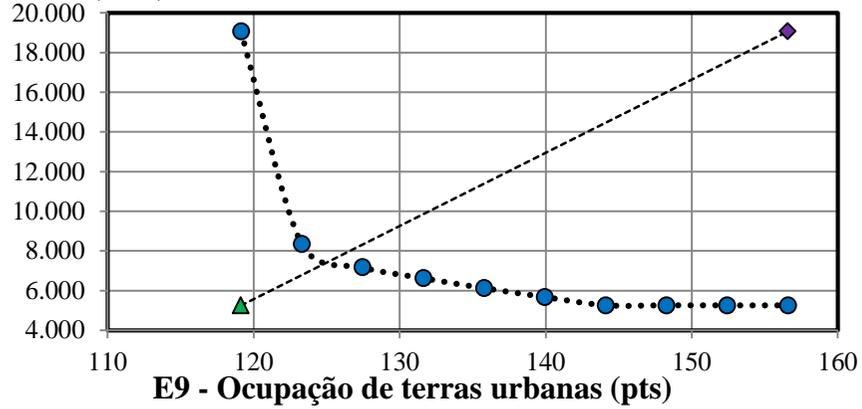


Anexo A2 – endpoint Caso 1



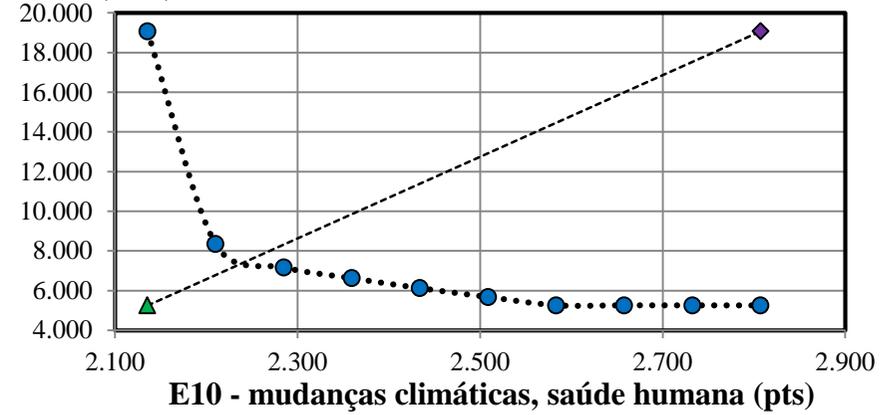


**Custo (US\$)**



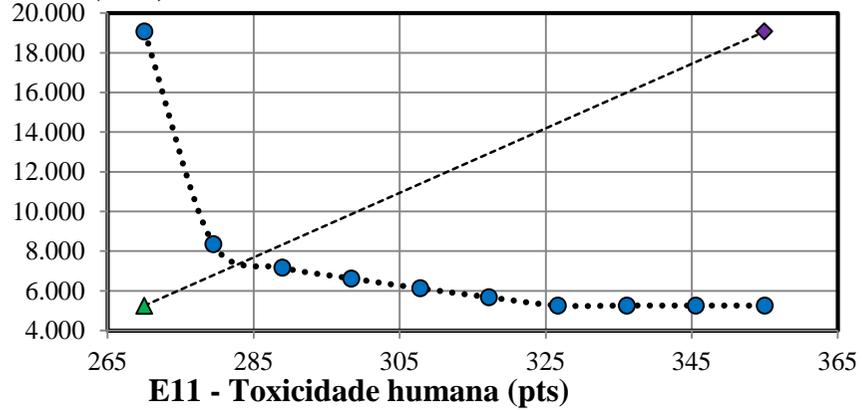
**E9 - Ocupação de terras urbanas (pts)**

**Custo (US\$)**



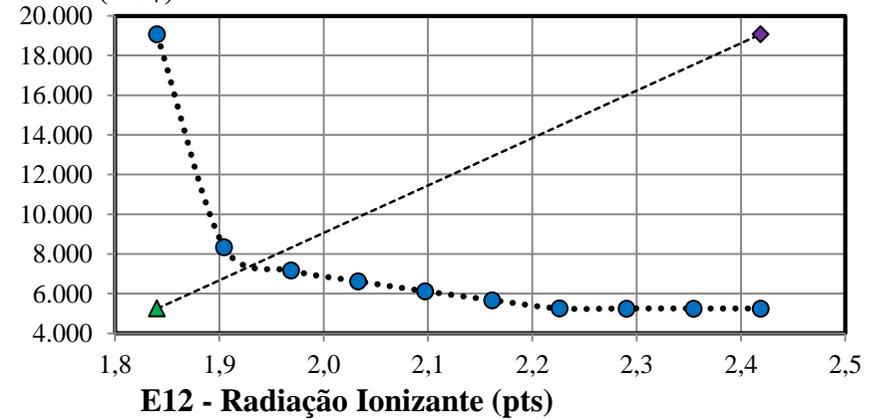
**E10 - mudanças climáticas, saúde humana (pts)**

**Custo (US\$)**

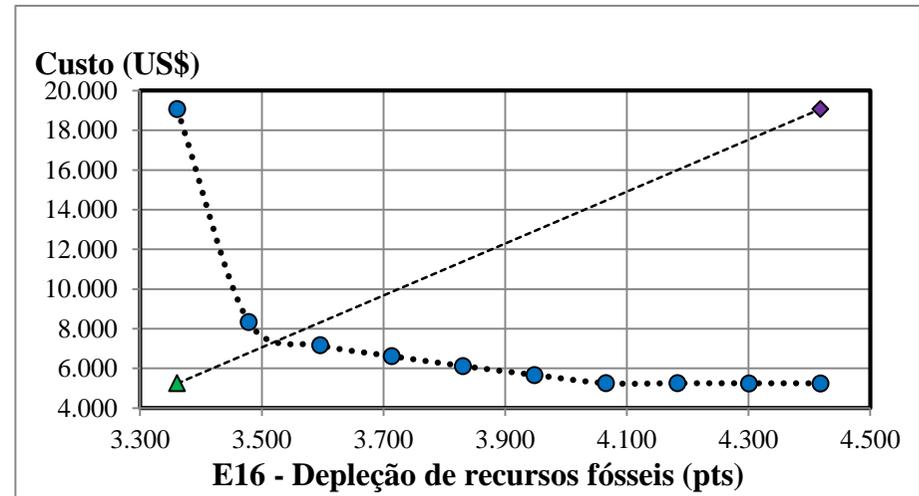
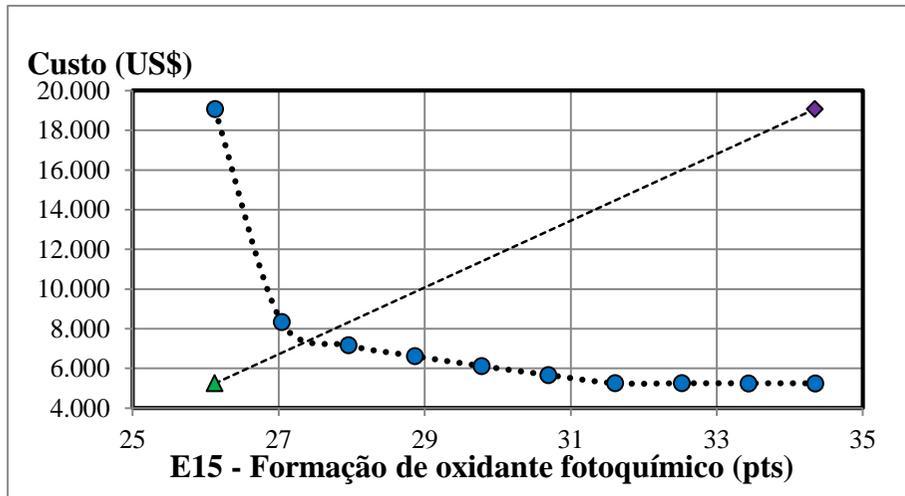
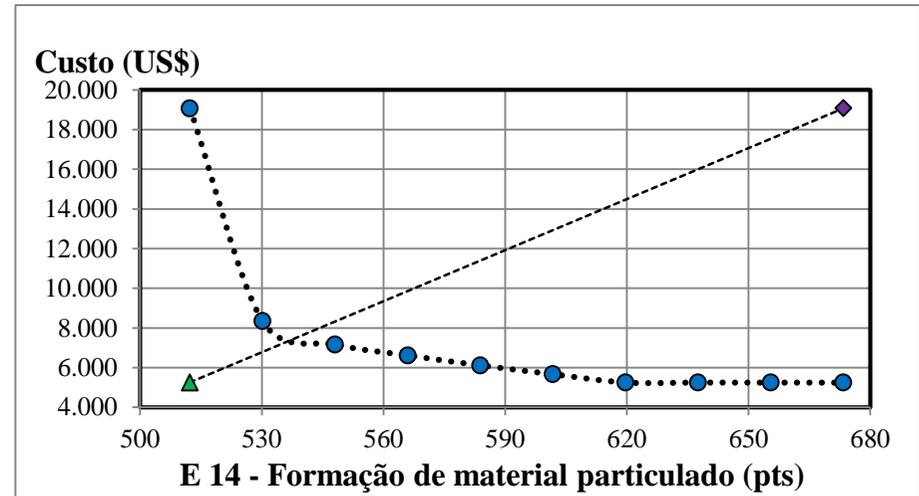
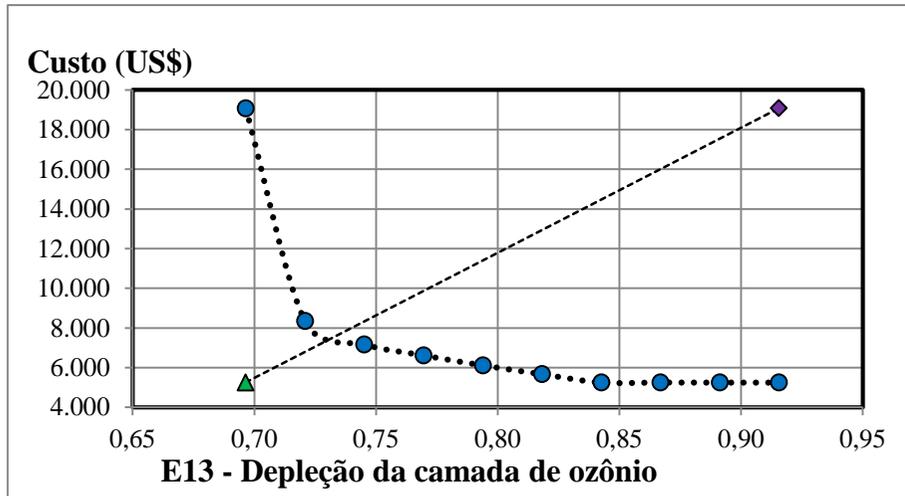


**E11 - Toxicidade humana (pts)**

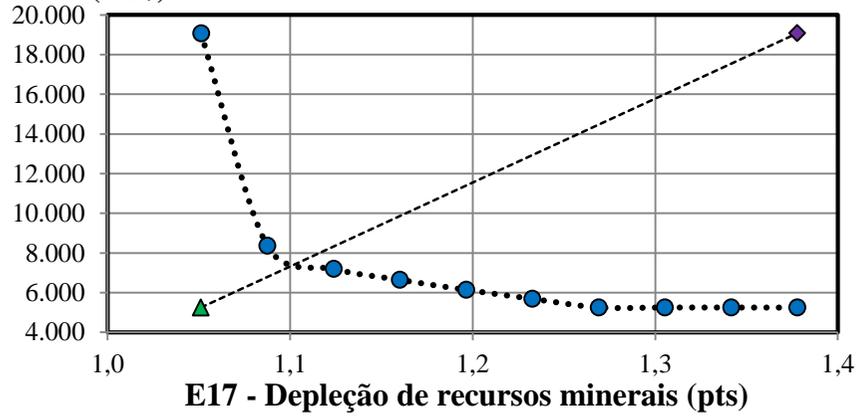
**Custo (US\$)**



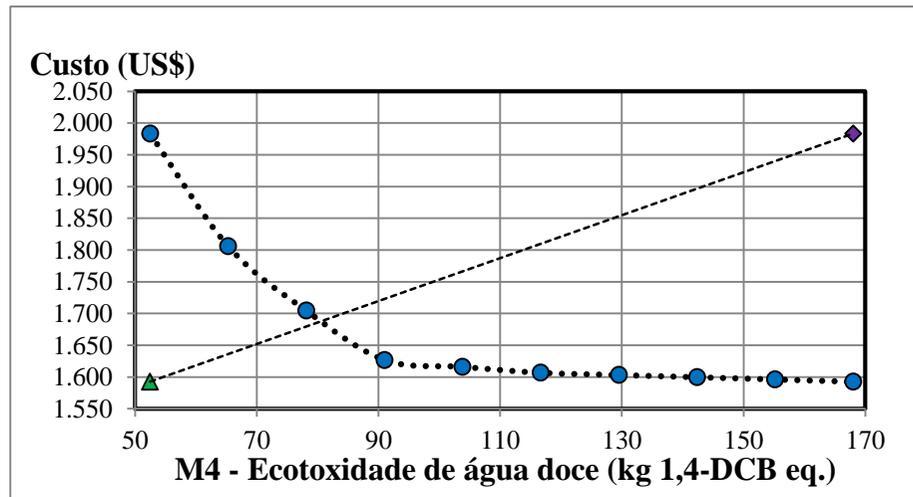
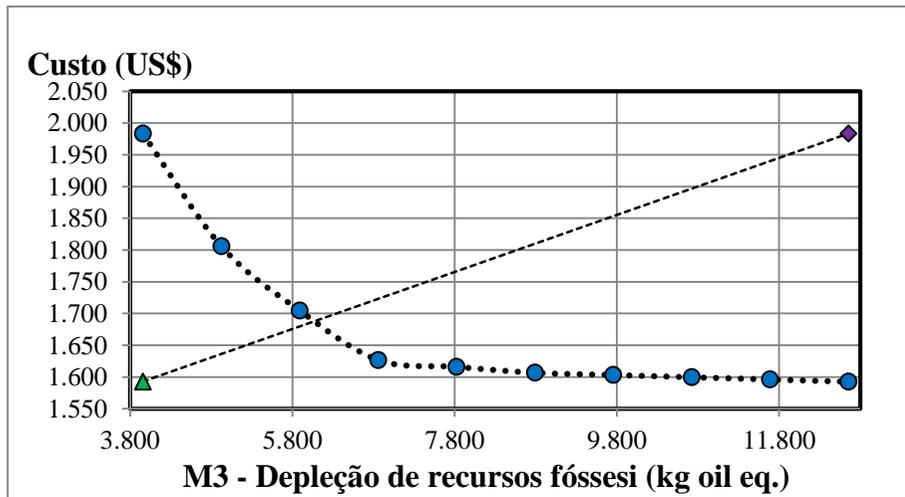
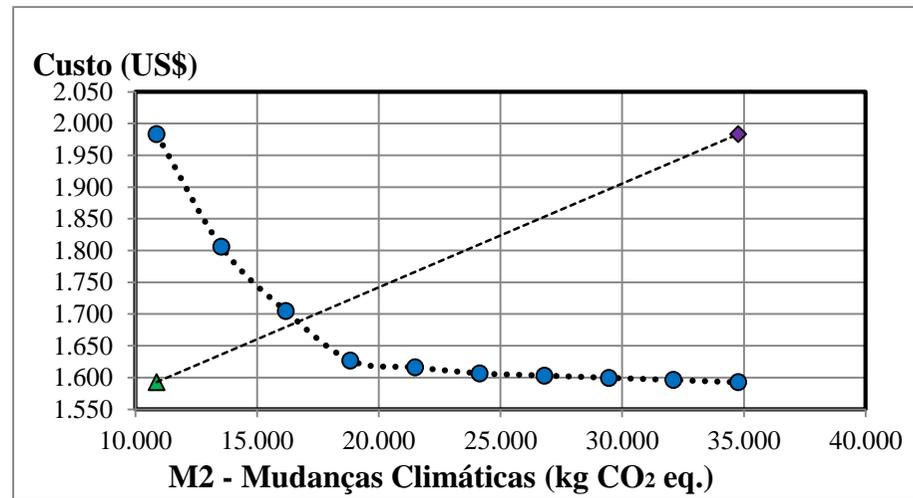
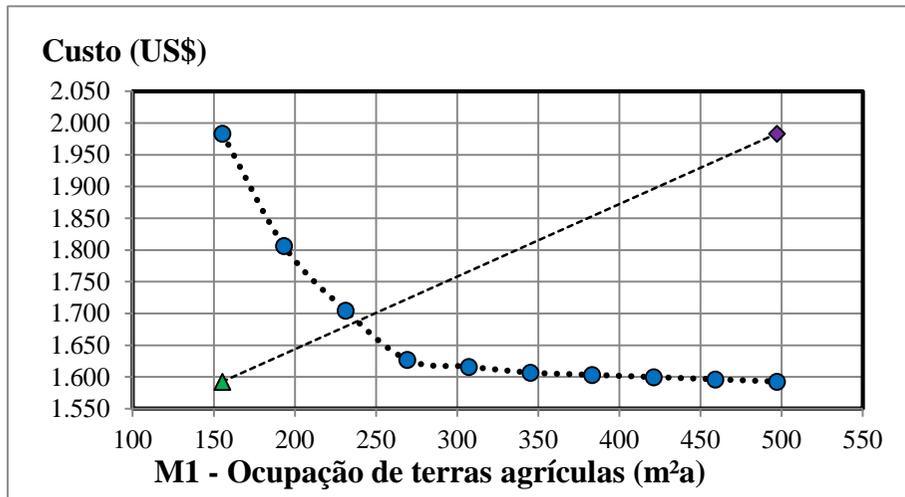
**E12 - Radiação Ionizante (pts)**

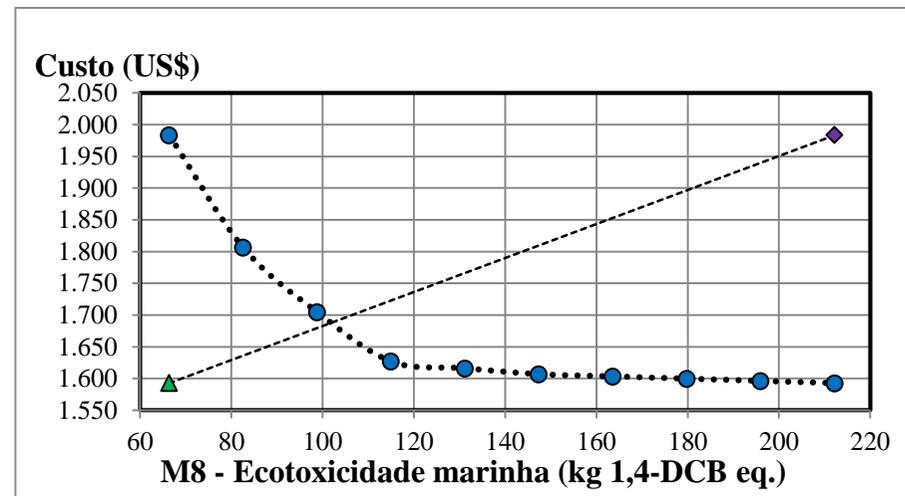
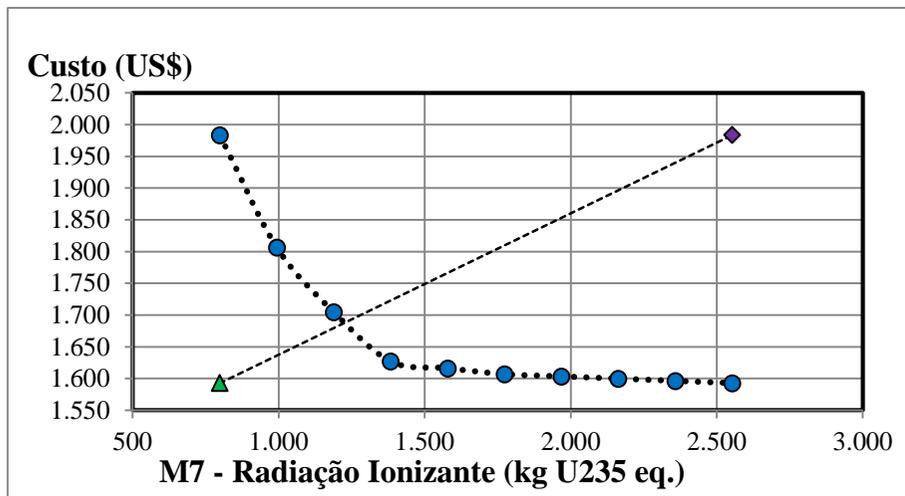
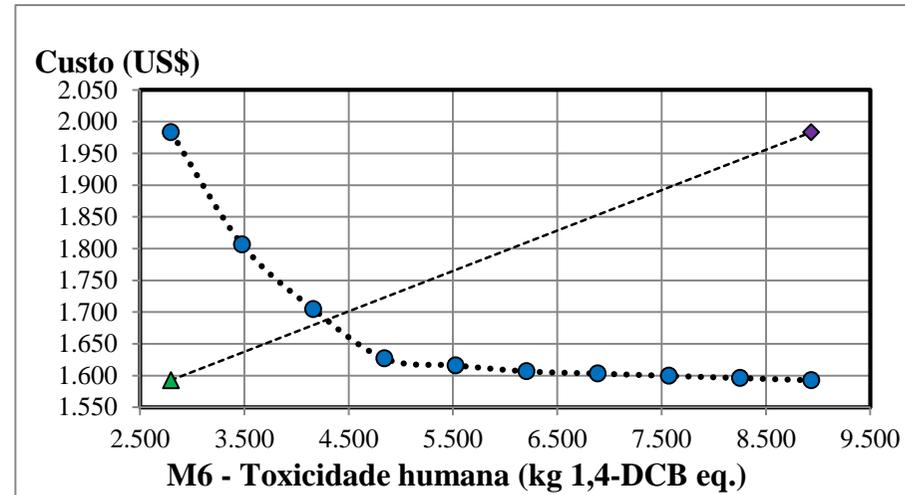
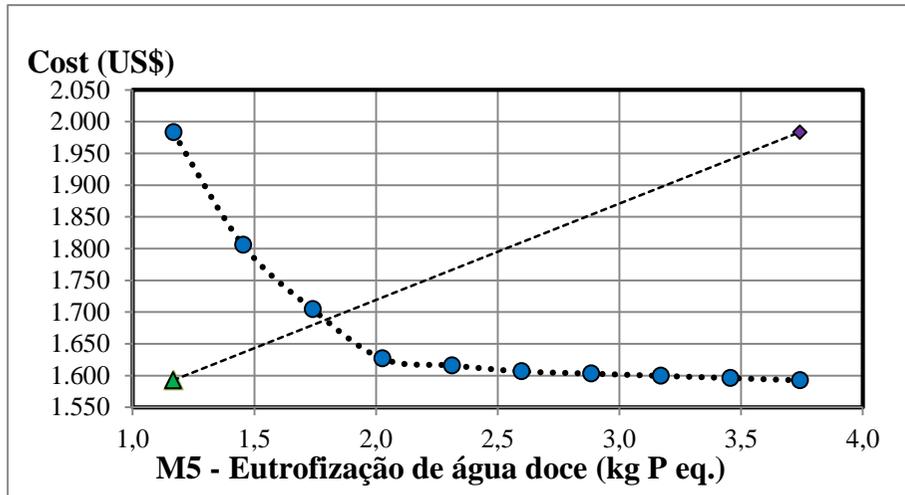


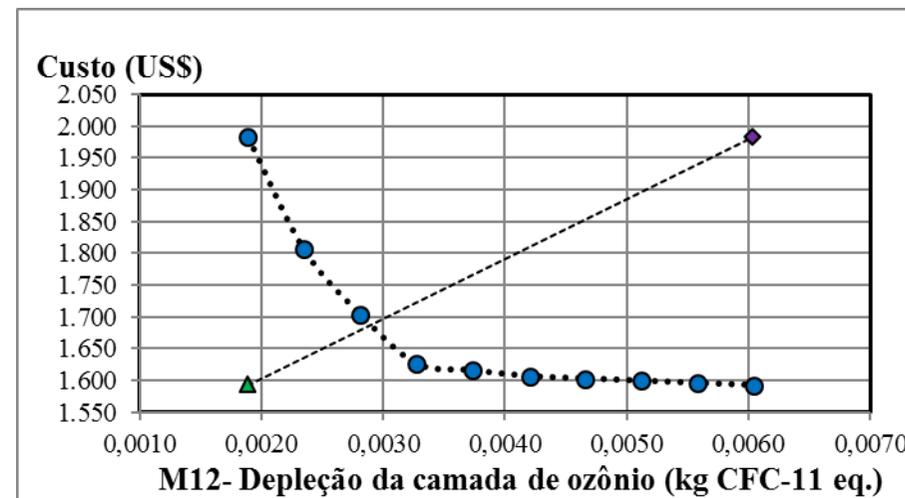
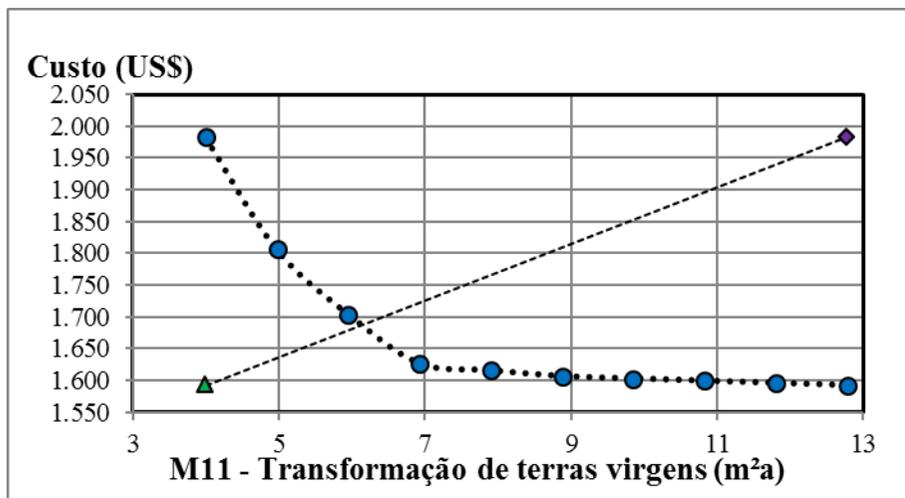
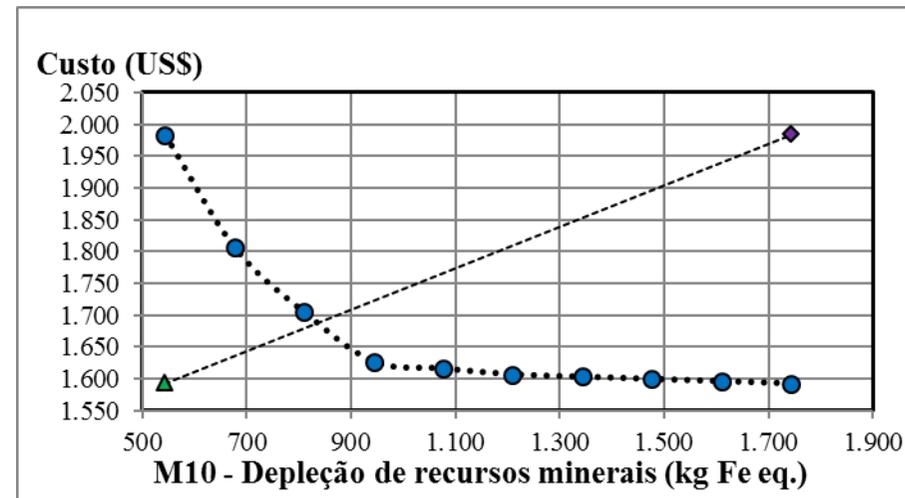
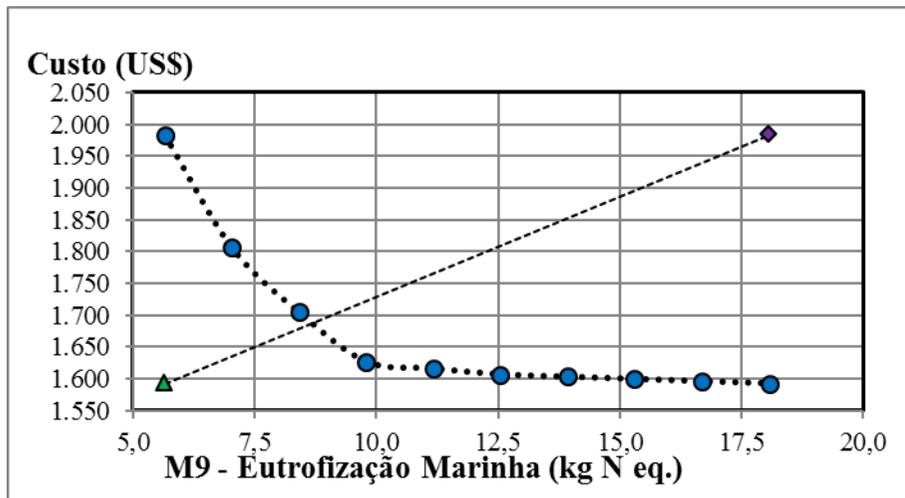
**Custo (US\$)**



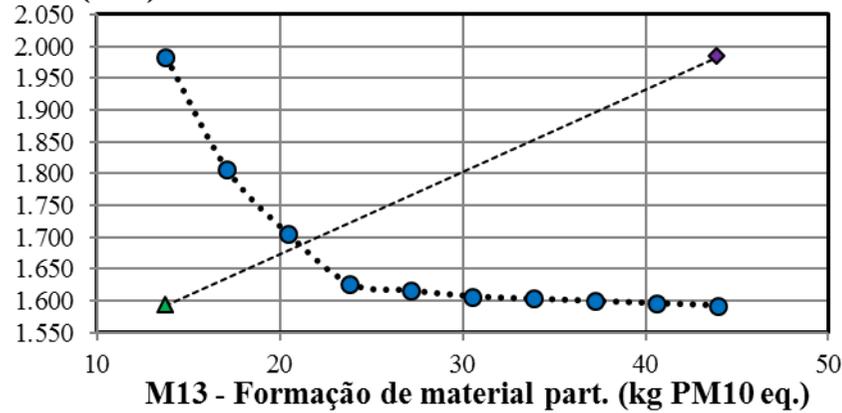
Anexo B1 – midpoint Caso 2



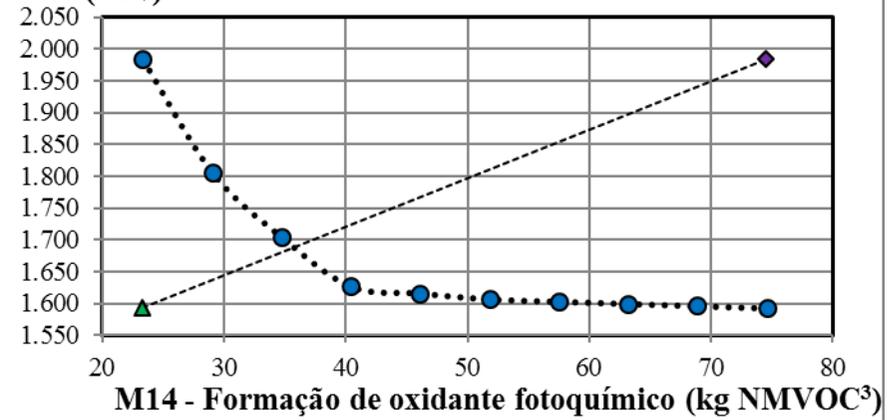




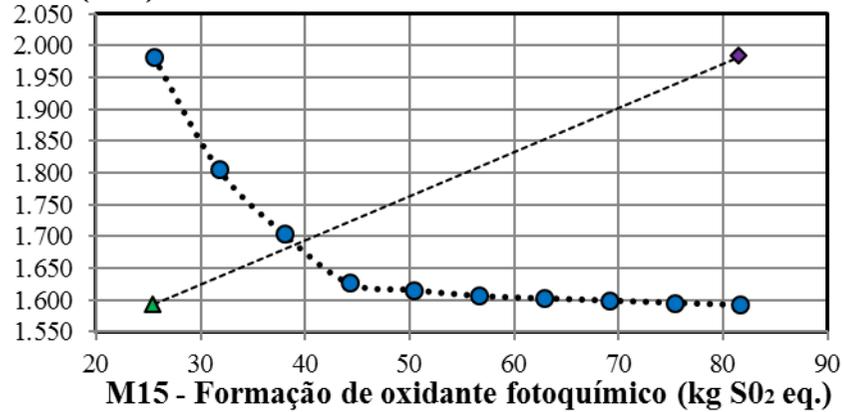
Custo (US\$)



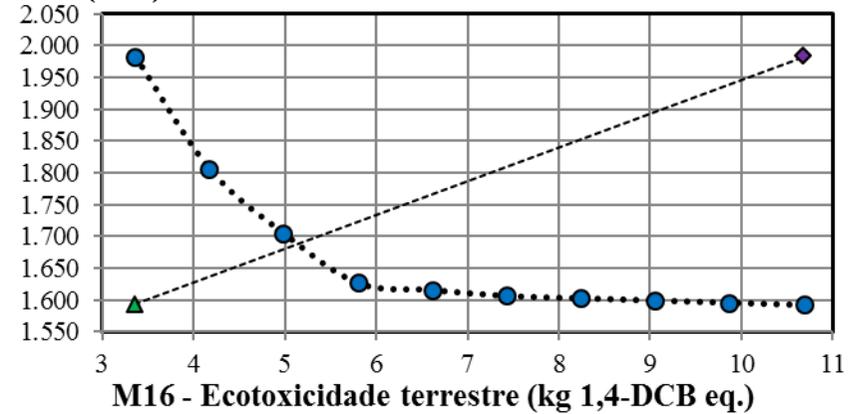
Custo (US\$)

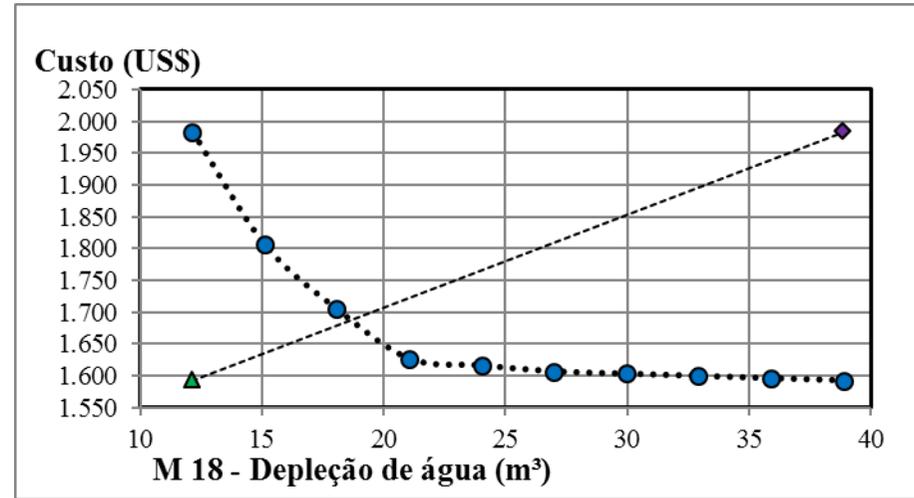
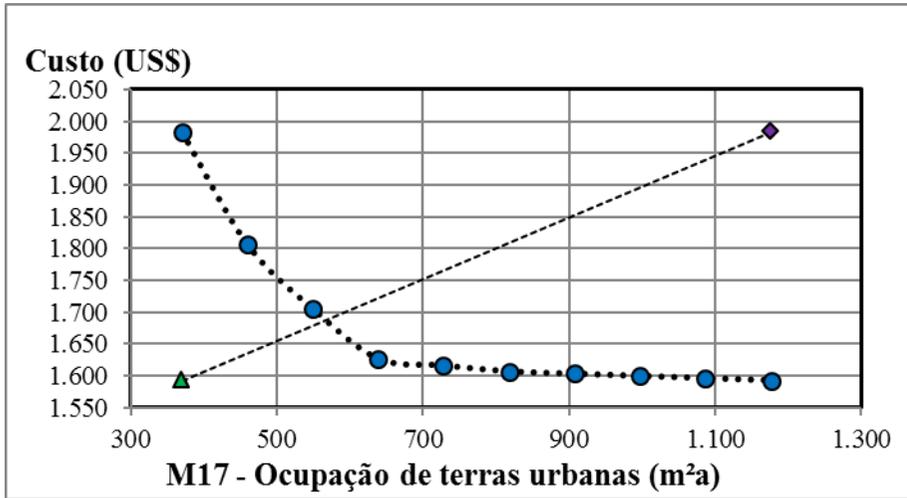


Custo (US\$)

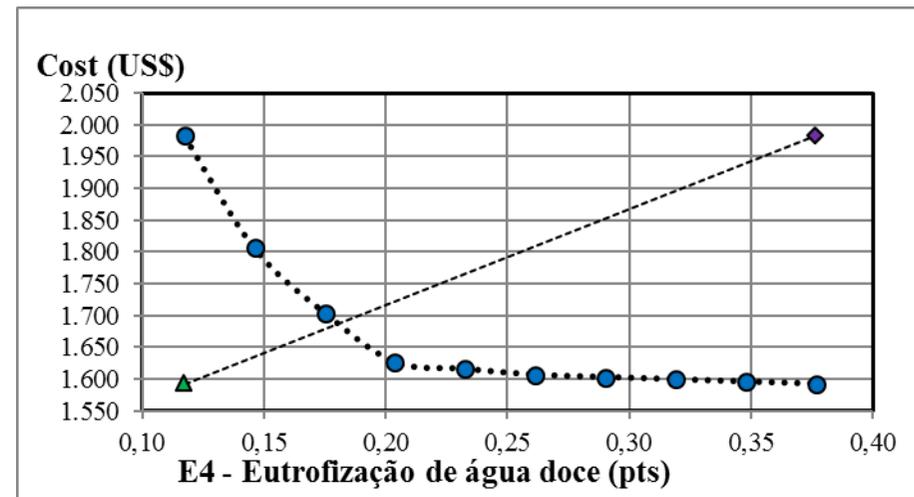
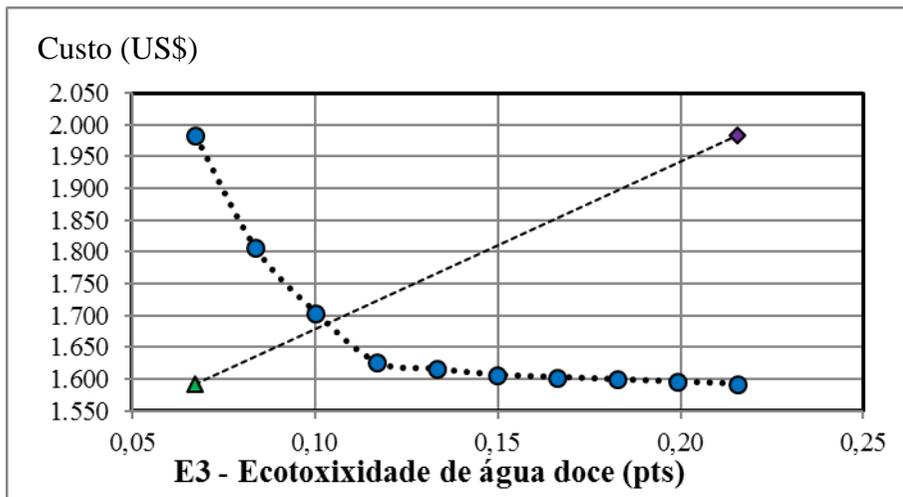
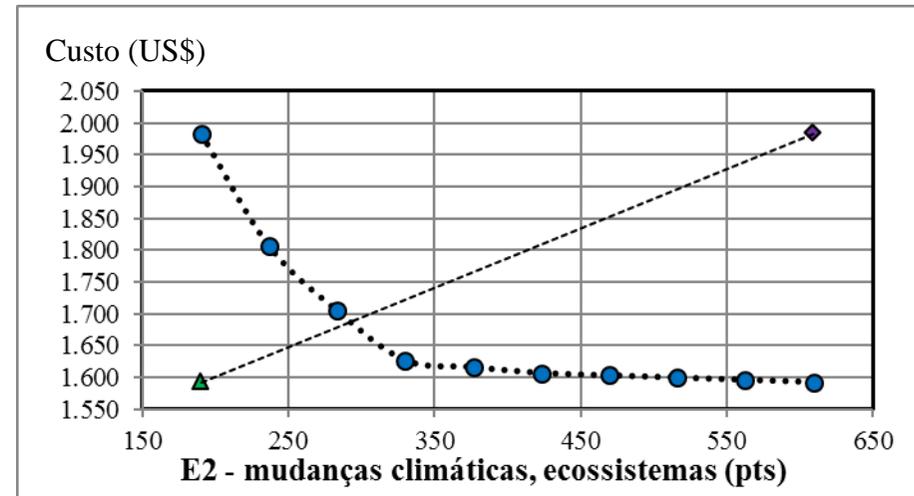
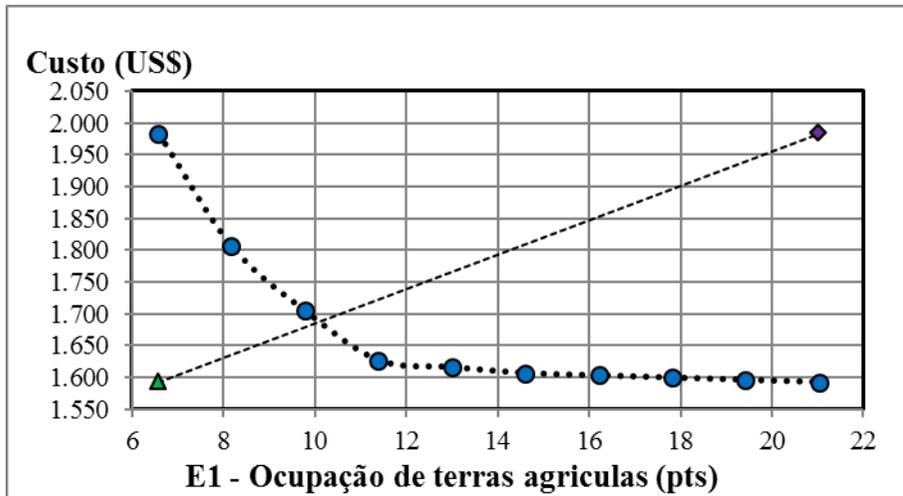


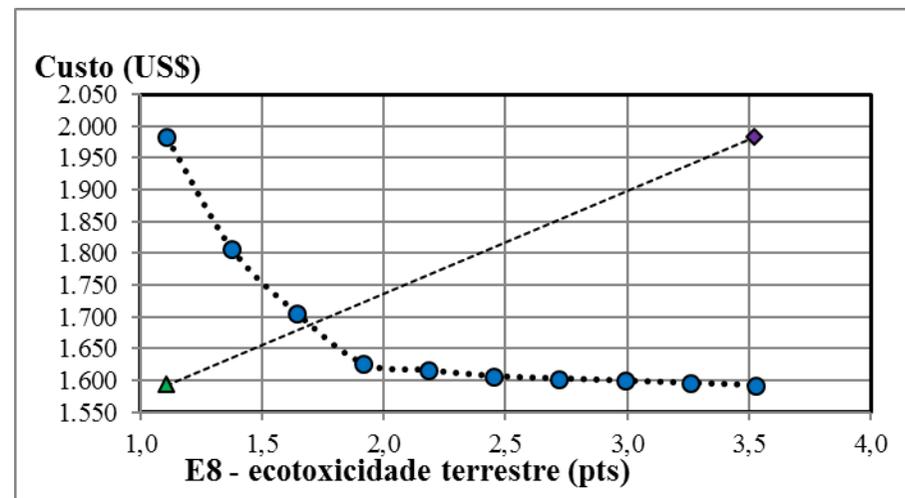
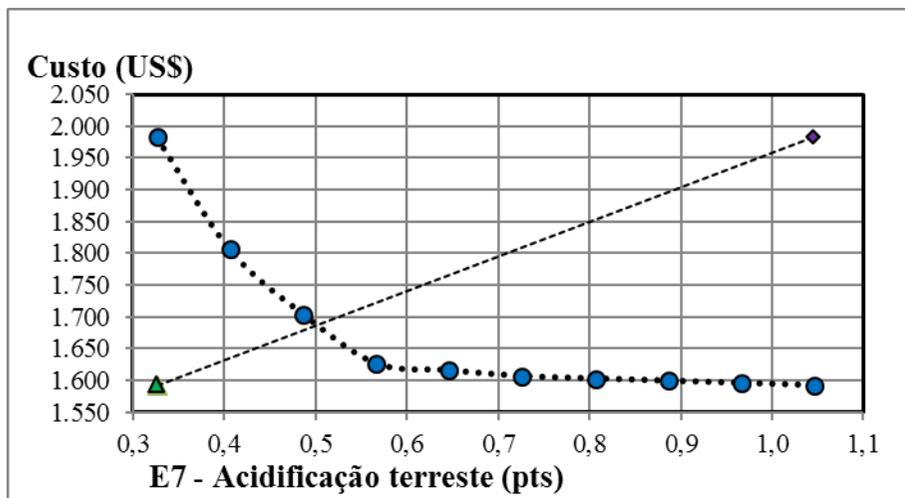
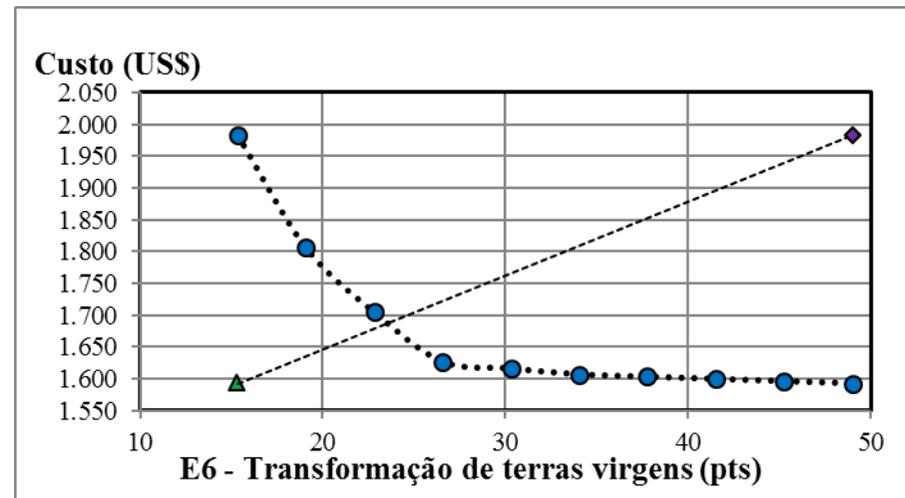
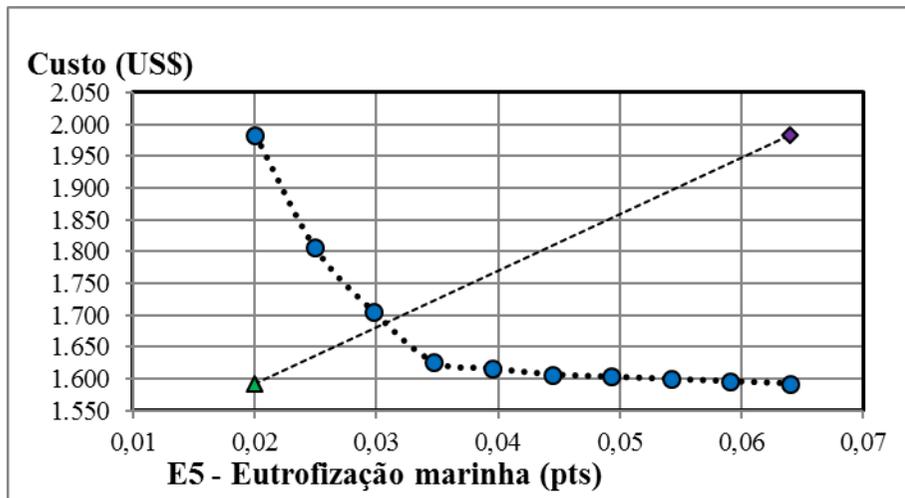
Custo (US\$)

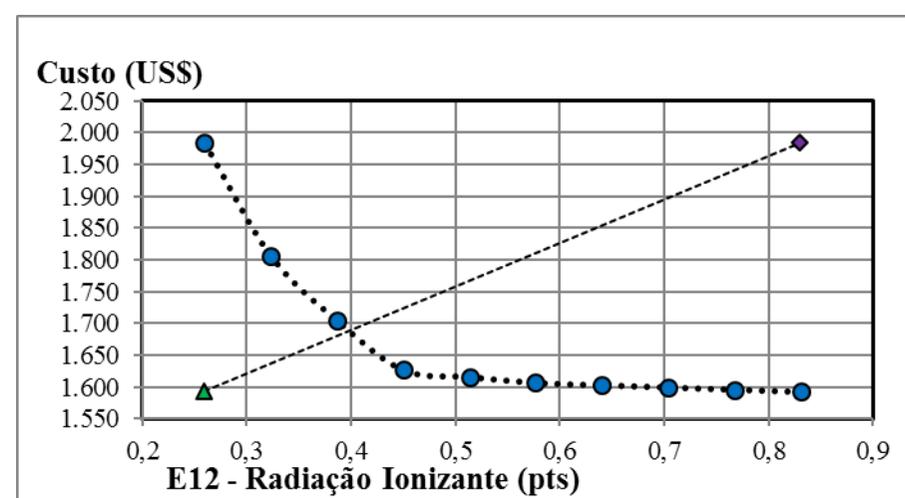
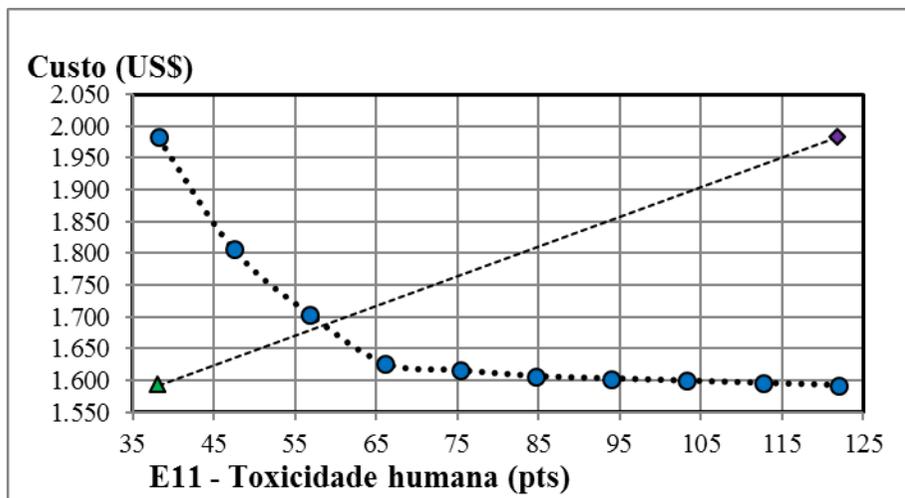
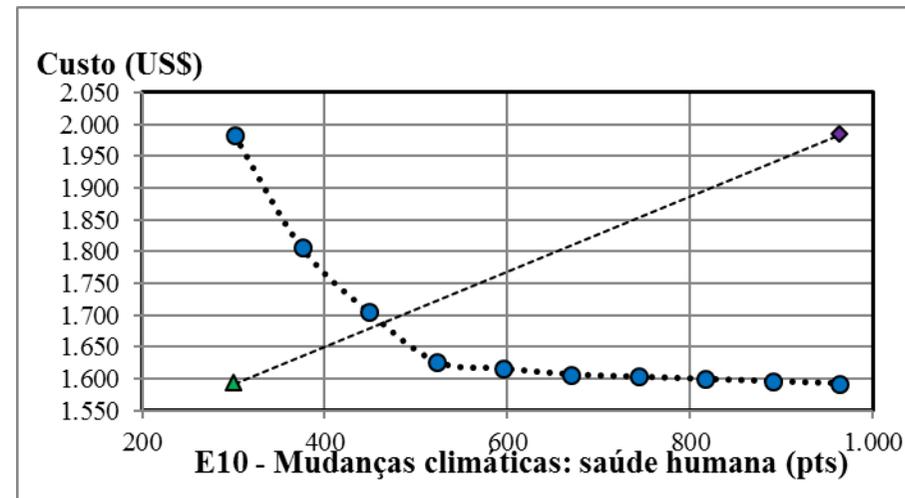
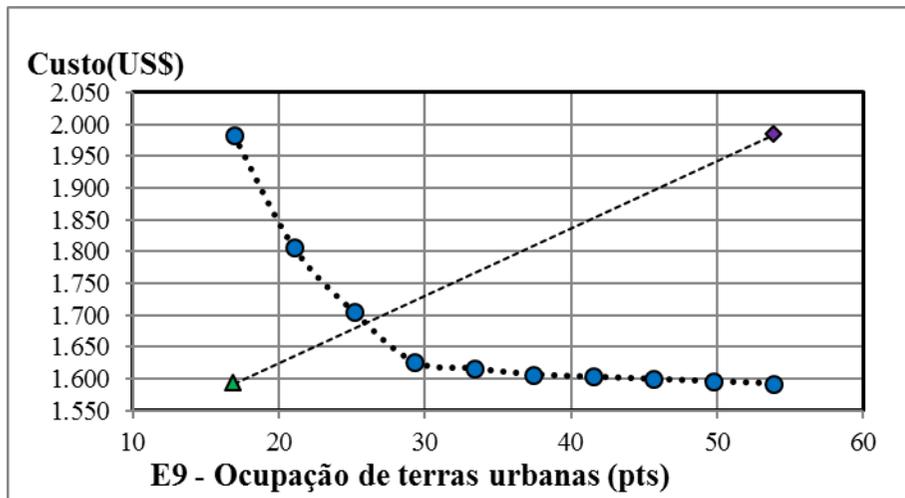


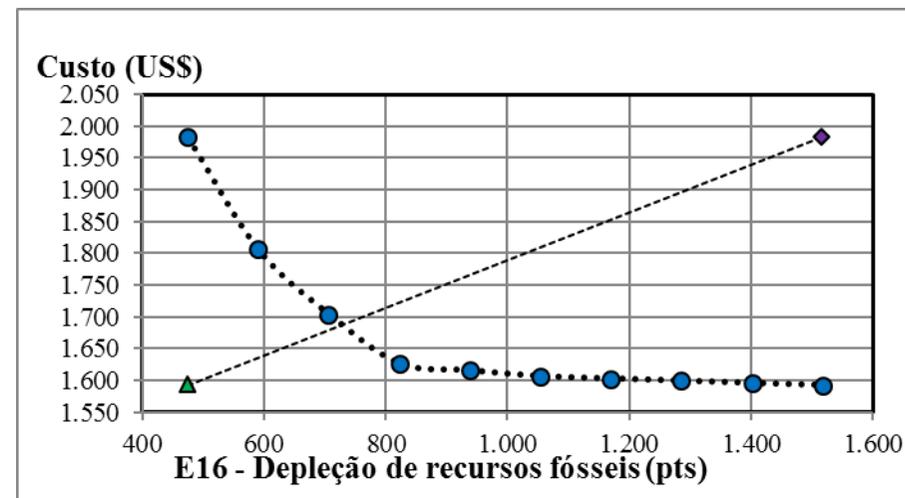
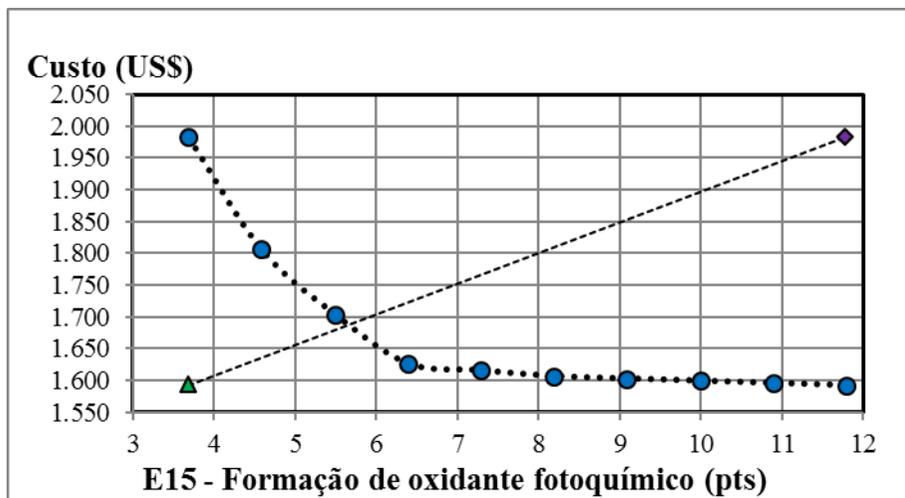
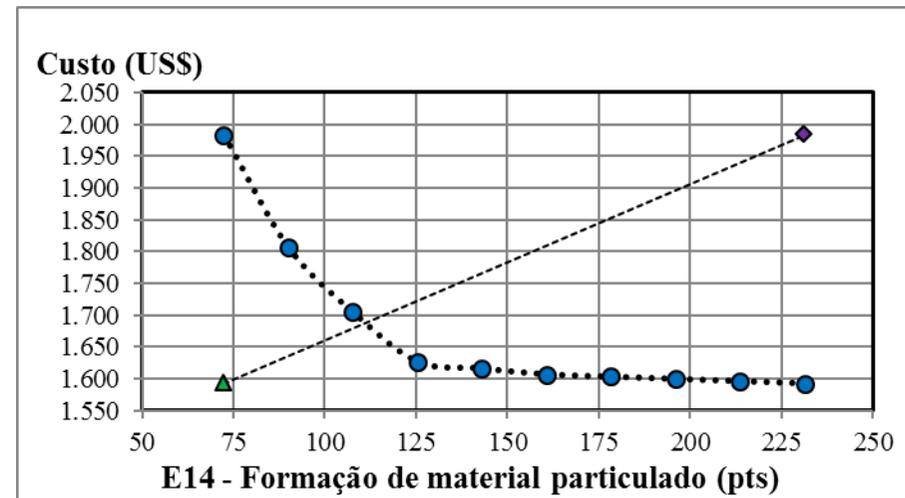
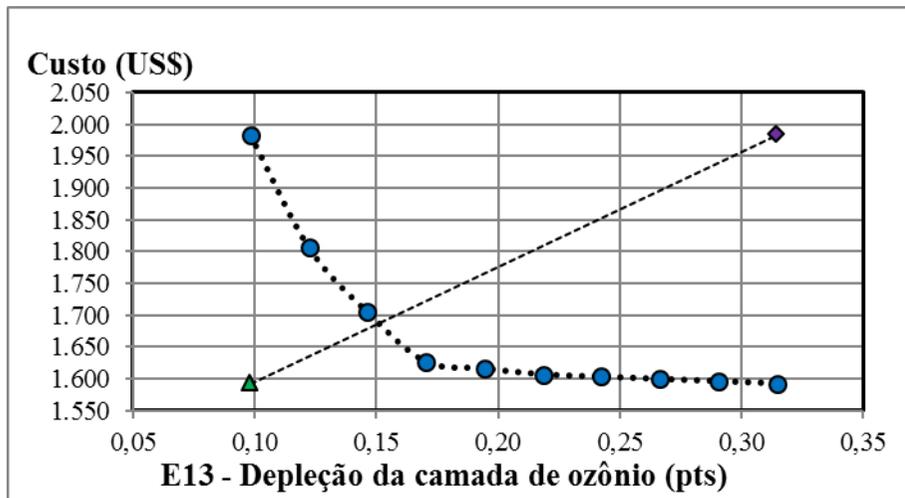


Anexo B2 – endpoint Caso 2

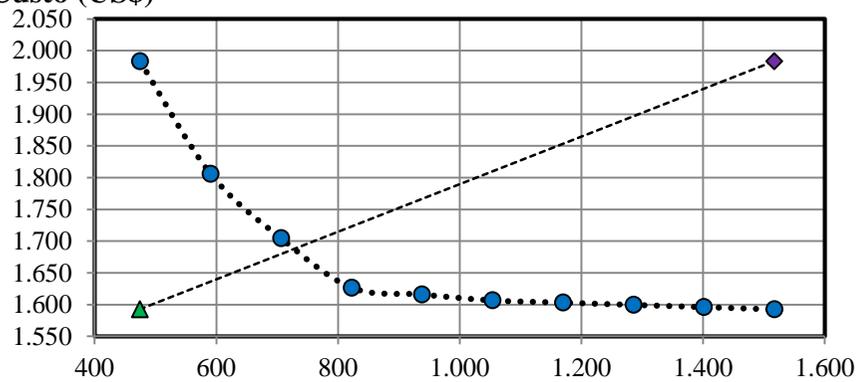








**Custo (US\$)**



**E17 - Depleção de recursos minerais**