

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
E DE MATERIAIS**

LUIS HENRIQUE NOVAK

**AVALIAÇÃO CONSEQUENCIAL DO CICLO DE VIDA:
INVENTÁRIO DO USO SOLO PARA PRODUÇÃO PREVISTA DE
BIODIESEL NO BRASIL EM 2030**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2013**

LUIS HENRIQUE NOVAK

**AVALIAÇÃO CONSEQUENCIAL DO CICLO DE VIDA:
INVENTÁRIO DO USO SOLO PARA PRODUÇÃO PREVISTA DE
BIODIESEL NO BRASIL EM 2030**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Manufatura, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus de Curitiba.

Orientadora: Prof.^a Cássia Maria Lie Ugaya,
Dr.^a

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIS HENRIQUE NOVAK

AVALIAÇÃO CONSEQUENCIAL DO CICLO DE VIDA: INVENTÁRIO DO USO SOLO PARA PRODUÇÃO PREVISTA DE BIODIESEL NO BRASIL EM 2030

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração em Engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Prof.^a Cássia Maria Lie Ugaya, Dr.^a
(UTFPR)

Prof. Arnaldo Cesar da Silva Walter, Dr.
(UNICAMP)

Prof.^a Carla Cristina Amodio Estorilio, Dr.^a
(UTFPR)

Curitiba, 30 de julho de 2013

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - PPGEM

AGRADECIMENTOS

À Deus, por essa experiência maravilhosa que é a vida.

À minha família, pelo incentivo e apoio.

À minha orientadora, Prof.^a Cássia Maria Lie Ugaya, pela oportunidade.

Aos colegas de mestrado pelo companheirismo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) pelas ótimas aulas e orientações.

Ao Núcleo de Tecnologia da Informação Aplicada ao Desenvolvimento de Produto (TIDeP) pelo espaço físico.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que desde o ensino médio vem contribuindo para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À Embrapa Soja pela excelente visita que nos proporcionaram na unidade de Londrina-PR.

Aos pesquisadores Jürgen Reinhard, da empresa suíça EMPA, e Andreas Ciroth, da empresa alemã GreenDeltaTC, pelos artigos enviados.

À Capes pelo auxílio financeiro, sem o qual a realização desse trabalho não teria sido possível.

Ao alertar as pessoas a respeito dos perigos da mudança climática, você é considerado um santo. Ao explicar o que precisa ser feito para parar com isso, chamam-no de comunista.

(George Monbiot)

NOVAK, Luis Henrique. **Avaliação consequencial do ciclo de vida: inventário do uso do solo para produção prevista de biodiesel no Brasil em 2030**. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) vêm gerando graves mudanças no clima mundial. Uma das soluções propostas para mitigar o problema é a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis. A eficácia dessa medida tem sido questionada, tendo em vista as possíveis consequências indiretas da produção agrícola. A Avaliação Consequencial do Ciclo de Vida é um método de avaliação ambiental de produtos que inclui efeitos indiretos. Diante disso, o objetivo do presente trabalho é aplicar o método para obtenção de um inventário do uso agrícola do solo necessário para incrementar a produção de óleo vegetal visando atender a mudança na demanda de biodiesel no Brasil prevista para o período 2010-2030. Das matérias-primas consideradas (soja, amendoim, algodão, dendê, girassol e canola), o estudo mostra que o óleo de dendê é a matéria-prima marginal e apenas 5% da área potencial para plantio de dendê seria utilizada para atender ao incremento na demanda de biodiesel. A área necessária diretamente pelo dendê seria de 2,1 milhões de hectares na região Norte do Brasil. A torta de amêndoa, co-produto dependente do processo multifuncional do dendê, pode substituir o farelo de soja usado como ração, evitando o plantio de 0,6 milhões de hectares de soja. Assim, o inventário final do uso do solo é um incremento 1,5 milhões de hectares para produção agrícola na região Norte do Brasil. Foram desenvolvidos cenários alternativos: produtividade do dendê constante, mudança no horizonte temporal (2010-2020) e mudança na taxa de crescimento do co-produto determinante. Não houve alteração no resultado do estudo para os cenários considerados.

Palavras-chave: Avaliação consequencial do ciclo de vida. Biodiesel. Óleos vegetais. Uso do solo.

NOVAK, Luis Henrique. **Consequential life cycle assessment: land use inventory for biodiesel production in Brazil estimated for 2030**. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

ABSTRACT

Greenhouse gas emission has several negative consequences on worldwide climate. Biofuels have been considered one of the solutions to mitigate this problem by substitution of fossil fuel. However, indirect effects should be included in order to produce more reliable results in environmental assessment. In this context, Consequential Life Cycle Assessment is a method that can fill this gap. The objective of this work is to use the method to obtain the agricultural land use inventory to meet the biodiesel demand change in Brazil, considering the period 2010-2030. Only the main feedstock were included (soybean, peanut, cottonseed, palm, sunflower and canola). From these, the study found the palm oil as the marginal one. Around 5% of the potential area for palm would be used to meet the biodiesel demand change. The increased area would be 2,1 million hectares in North region of Brazil. The palm meal, which is a dependent co-product from multifunctional process, can substitute soybean meal as animal feed. The substitution avoids 0,6 million hectares of soybean in North region. Finally, the net land use inventory is 1,5 million hectares in North region of Brazil. Three alternative cenarios were developed: palm productivity unchanged, a different time horizon (2010-2020) and a different increasing rate for the determinant co-product. The same result was found for all cenarios.

Keywords: Consequential life cycle assessment. Biodiesel. Vegetable oil. Land use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões mundiais antrópicas de GEE em 2004, em CO ₂ eq.....	19
Figura 2 – ACV atribucional e consequencial.....	32
Figura 3 – Sistema de produto com mais de uma função	40
Figura 4 – Subdivisão de um sistema multifuncional.....	41
Figura 5 – Expansão do sistema para eliminar a alocação	42
Figura 6 – Alocação por relações causais físicas em processos multifuncionais.....	45
Figura 7 – Relações de causalidade como base para alocação	46
Figura 8 – Unidade funcional e fluxo de referência em ACV consequencial	52
Figura 9 – Fluxograma para identificação de processos afetados	59
Figura 10 – As mudanças afetam processos específicos ou o mercado.....	62
Figura 11 – Custos médios de produção no curto e no longo prazo	66
Figura 12 – Modelo teórico para processos multifuncionais.....	70
Figura 13 – Cadeia de processos multifuncionais	75
Figura 14 – Co-produtos da soja	80
Figura 15 – Co-produtos do algodão	81
Figura 16 – Co-produtos do girassol	81
Figura 17 – Co-produtos da canola	82
Figura 18 – Co-produtos do dendê.....	83
Figura 19 – Co-produtos do amendoim.....	84
Figura 20 – Estimativa da quantidade de dendê e substituições no mercado.....	102
Figura 21 - Fases da ACV	132
Figura 22– Função, unidade funcional e fluxo de referência.....	134
Figura 23 - Exemplo de um sistema de produto para ACV	135
Figura 24 – Elementos da fase de AICV	139
Figura 25 – Equilíbrio de mercado	144
Figura 26 – Perfeita elasticidade e perfeita inelasticidade	146

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipologia de teorias da ética normativa	34
Quadro 2 – Conexões entre a ética normativa e ACV.....	35
Quadro 3 – Vantagens e limitações das abordagens atribucional e consequencial..	50
Quadro 4 – Identificação da tecnologia afetada	68
Quadro 5 – Tecnologias afetadas no modelo teórico multifuncional	72
Quadro 6 – Avaliação da abordagem consequencial	112
Quadro 7 – Exemplo de classificação dos fluxos elementares	138
Quadro 8 – Exemplos de categorias de impacto e fatores de caracterização.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução das emissões de GEE no Brasil, em Gg.....	20
Tabela 2 – Produção de oleaginosas, óleos vegetais e aplicações, em 2010	87
Tabela 3 – Área potencial para expansão agrícola	89
Tabela 4 – Incremento potencial na quantidade de óleo vegetal disponível para biodiesel em 2030	92
Tabela 5 – Delimitação do sistema	95
Tabela 6 – Resultado do inventário do uso do solo.....	99
Tabela 7 – Incremento potencial na quantidade de óleo vegetal disponível para biodiesel em 2030 com a produtividade do dendê inalterada	105
Tabela 8 – Incremento potencial na quantidade de óleo vegetal disponível para biodiesel em 2020	107
Tabela 9 – Delimitação do sistema com horizonte temporal 2010-2020	108
Tabela 10 – Delimitação do sistema para diferente taxa de crescimento do co-produto determinante	110
Tabela 11 – Identificação do co-produto determinante	153

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.a.	Taxa anual
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
CO ₂ eq.	Dióxido de carbono equivalente
GEE	Gases de efeito estufa
Gg	Gigagramas
ha	Hectares
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
kg/ha	Quilogramas por hectare
kg/m ³	Quilogramas por metro cúbico
kWh	Quilowatt-hora
m ³ /ano	Metros cúbicos anuais
mi ton	Milhões de toneladas
mil ton	Milhares de toneladas
mi ha	Milhões de hectares
mil ha	Milhares de hectares
mi m ³	Milhões de metros cúbicos
MJ	Megajoule
ppm	Partes por milhão
R\$/ha	Reais por hectare
tep	Toneladas equivalentes de petróleo
US\$/ton	Dólares por tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVO	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	PANORAMA DAS EMISSÕES DE GEE NO BRASIL E NO MUNDO	18
2.2	ALGUNS DADOS ACERCA DO BIODIESEL NO BRASIL	22
2.2.1	Processo industrial	23
2.2.2	Capacidade instalada	23
2.2.3	Leilões de biodiesel	24
2.2.4	Sustentabilidade da soja	24
2.2.5	Sustentabilidade do biodiesel fabricado a partir da soja	26
2.2.6	Selo combustível social para o biodiesel	27
2.3	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	28
2.3.1	Normas para ACV	30
2.4	AS ABORDAGENS DE ACV: ATRIBUCIONAL E CONSEQUENCIAL	31
2.4.1	Fundamentos éticos	33
2.4.2	Estudos prospectivos e retrospectivos	37
2.4.3	Dados de inventário em função da abordagem	37
2.4.4	Relação entre procedimento de alocação e a abordagem	39
2.4.4.1.	<i>Procedimentos de alocação conforme as normas ISO</i>	40
2.4.4.2.	<i>Crítica à alocação recomendada pelas normas ISO</i>	46
2.4.5	Aplicações	48
2.4.6	Vantagens e limitações	49
2.4.7	As normas ISO e as duas abordagens	51
3	MÉTODOS	52
3.1	UNIDADE FUNCIONAL EM ACV CONSEQUENCIAL	52
3.1.1	Descrição do produto em termos de propriedades	53
3.1.2	Determinar o segmento de mercado e os produtos alternativos	55
3.1.3	Definir a unidade funcional	56
3.1.4	Fluxos de referência de cada alternativa	57
3.2	DELIMITAÇÃO DO SISTEMA EM ACV CONSEQUENCIAL	58
3.2.1	Horizonte de tempo e escala da mudança estudada	60
3.2.1.1.	<i>Escala da mudança estudada</i>	60
3.2.1.2.	<i>Horizonte de tempo das conseqüências da mudança</i>	60
3.2.2	A mudança afeta processos específicos ou o mercado?	61
3.2.3	Tendência do mercado	63
3.2.4	Restrições na produção	63
3.2.5	Tecnologias mais sensíveis à mudança	65
3.3	PROCEDIMENTO PARA PROCESSOS MULTIFUNCIONAIS	69
3.3.1	Modelo teórico de expansão do sistema para processos multifuncionais	70
3.3.2	Situações complexas	73
3.4	AVALIAÇÃO CONSEQUENCIAL DO USO AGRÍCOLA DO SOLO	76
4	RESULTADOS	78
4.1	UNIDADE FUNCIONAL E FLUXO DE REFERÊNCIA	78
4.2	DELIMITAÇÃO DO SISTEMA	84
4.3	INVENTÁRIO DO USO DO SOLO	98

4.4	CENÁRIOS ALTERNATIVOS.....	104
4.4.1	Produtividade do dendê permanece inalterada.....	104
4.4.2	Mudança no horizonte de tempo do estudo.....	106
4.4.3	Mudança na taxa de crescimento do co-produto determinante	109
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
5.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO	111
5.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTUDO DE CASO	114
5.3	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	117
	REFERÊNCIAS.....	119
	APÊNDICES	130

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Um dos grandes desafios da atualidade é conciliar desenvolvimento econômico com preservação ambiental. A indústria necessita produzir e, simultaneamente, precisa reduzir os impactos ao meio ambiente que vêm sendo causados pela crescente demanda por bens e serviços. Os problemas ambientais decorrentes da atividade humana, como as mudanças climáticas e o esgotamento dos recursos naturais, mostram que não é mais aceitável qualquer atividade industrial sem que se leve em consideração as relações que o produto tem, ou terá, com o meio ambiente (MANZINI; VEZZOLI, 2005).

De acordo com o IPCC (2007), as mudanças climáticas são um dos principais problemas ambientais provocados pelas atividades humanas, o que tem sido evidenciado pelo aumento das médias mundiais de temperatura do ar e do oceano, o degelo em regiões frias e o aumento médio do nível do mar. A causa mais importante das alterações do clima provocadas pela humanidade é, muito provavelmente, a emissão de gases de efeito estufa (GEE). As concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), principais gases causadores do efeito estufa, vêm aumentando desde a Revolução Industrial. O gás de efeito estufa emitido em maior quantidade no mundo é o dióxido de carbono (CO_2) e a queima de combustíveis fósseis é a atividade que mais contribui para isso.

Nesse contexto, o uso de biocombustíveis, em substituição aos combustíveis derivados do petróleo, tem sido considerado uma das soluções para redução das emissões de gases estufa para a atmosfera. No entanto, diante do provável aumento da produção agrícola para fornecimento de matéria-prima para a fabricação de biocombustíveis, os propalados benefícios ambientais desse tipo de produto têm sido vistos com desconfiança. Conforme a FAO (2008), há impactos ambientais em toda a cadeia produtiva de biocombustíveis, sendo os mais significativos aqueles relacionados com a intensificação da agricultura e com o desmatamento.

A questão é paradoxal, já que os benefícios potenciais dos biocombustíveis são decorrentes do seqüestro de carbono resultante do crescimento dos vegetais geralmente usados como matéria-prima, mas esse cultivo pode provocar liberações

de carbono que havia sido absorvido por décadas e armazenado no solo e na vegetação nativa (SEARCHINGER *et al.*, 2008). De acordo com Fargione *et al.* (2008), nos últimos anos diversos ecossistemas foram transformados para produção de biocombustíveis, principalmente nas Américas e no sudeste da Ásia. Além disso, parte da produção em áreas já cultivadas está sendo desviada para o mesmo fim. Com isso, concluem que os biocombustíveis, se causadores de transformação de ecossistemas nativos, podem ser maiores emissores líquidos de GEE do que os combustíveis fósseis.

Para Ernsting, Rughani e Boswell (2007) e Lapola *et al.* (2009), uma avaliação eficaz de dado biocombustível deve levar em consideração as potenciais mudanças diretas e indiretas no uso do solo. É considerada uma mudança direta aquela causada pela própria cultura a ser usada para produção de biocombustível, seja a transformação de uma floresta nativa ou a ocupação de uma área antes usada para outra finalidade. A expansão da agricultura sobre áreas antes ocupadas para outras atividades pode, contudo, deslocar estas atividades em direção a novas áreas, provocando o que se denomina de mudança indireta. Ainda conforme os mesmos autores, apesar da mudança indireta decorrente do uso do solo comprometer consideravelmente a redução nas emissões de GEE proporcionada pelos biocombustíveis, normalmente não são incluídas nos estudos de avaliação do impacto ambiental dos biocombustíveis.

Infelizmente, as emissões decorrentes da mudança no uso do solo são difíceis de quantificar. Em primeiro lugar, há carência de métodos adequados para determinar quais são as áreas indiretamente afetadas pelo uso agrícola do solo. Por essa razão, os estudos não têm sido espacialmente completos (SEARCHINGER *et al.*, 2008; LAPOLA *et al.*, 2009). Em segundo lugar, as estimativas de emissões de gases de efeito estufa provocadas pela mudança no uso do solo, tanto em áreas diretamente dedicadas à matéria-prima para biocombustíveis como em áreas indiretamente afetadas, necessitam de abordagens mais confiáveis (MELILLO *et al.*, 2009).

A questão é particularmente preocupante nas regiões tropicais, onde a agricultura e o desmatamento, de modo geral, são as principais causas de emissões de gases de efeito estufa (CERRI *et al.*, 2007). Especificamente no Brasil, a principal fonte de emissões desses gases é o setor de mudança no uso da terra e florestas (CERRI *et al.*, 2009; MCT, 2010). Para Lapola *et al.* (2009), o aumento da demanda

por biocombustíveis no Brasil pode deslocar outras atividades, sobretudo a pecuária, em direção à floresta Amazônica e ao Cerrado. De acordo com os mesmos autores, existe o agravante de que a produção pecuária no país é extremamente ineficiente, demandando grandes extensões de terras.

Em contraste, Nogueira e Capaz (2013) mostram que o Brasil possui elevada disponibilidade de áreas agricultáveis, sem que haja necessidade de qualquer desmatamento. De acordo com os autores, o Brasil possui uma área total de 851,4 milhões de hectares, sendo aproximadamente 9% utilizada pela agricultura e 20% ocupada por pastagens. Em 2011 foram usados 3,14 milhões de hectares para a produção de soja e 0,11 milhões de hectares para produção de algodão, ambos destinados para a produção de biodiesel. Em outras palavras, aproximadamente 5% da área agrícola do país foi destinada ao biodiesel. Essa área pode ser reduzida consideravelmente se forem adotadas fontes mais eficientes de óleo vegetal, como por exemplo, o dendê ou outras palmáceas. Considerando um cenário conservador, estima-se que o país dispõe de uma área adequada de 29,7 milhões de hectares para plantio de dendê dentro da Amazônia Legal. A área desmatada na Amazônia brasileira é estimada em 70,4 milhões de hectares, o que representa 13,9% da área total do país e quase 2,4 vezes a área apta para dendê. Esses números mostram que a possibilidade de expansão da produção de óleo de dendê é suficiente para atender as necessidades da indústria de biodiesel.

Outro importante aspecto levantado por Nogueira e Capaz (2013) com relação ao uso do solo para produção de biodiesel no Brasil é o enorme potencial para recuperação de áreas degradadas, resgatando-as economicamente. Essas áreas são resultado da prática da pecuária extensiva durante décadas, que gerou quase 200 milhões de hectares de pastos. Com o aumento da produtividade da pecuária, a área por ela ocupada vem decrescendo de modo que áreas antes ocupadas pela pecuária podem ser utilizadas para a atividade agrícola. O processo de intensificação da pecuária está longe de ser concluído, portanto, novas áreas serão liberadas para a agricultura nas próximas décadas. Estima-se que existam de 60 a 75 milhões de hectares de pastagens degradadas no Brasil, as quais podem ser recuperadas e disponibilizadas para outras atividades.

Apesar da controvérsia que há em torno dos biocombustíveis derivados de produtos agrícolas, o Governo Brasileiro, com o intuito de reduzir os impactos ambientais e também por questões ligadas ao desenvolvimento do país, tem

estimulado a sua aplicação. Especificamente com relação ao biodiesel, foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), visando fomentar a utilização do biodiesel como substituto parcial do diesel derivado do petróleo no sistema de transportes do país. Em 13 de janeiro de 2005 foi publicada a Lei 11.097, que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. A lei obrigou a mistura mínima de 2% (B2) de biodiesel ao diesel derivado do petróleo a partir de janeiro de 2008, com previsão de aumento progressivo até atingir 5% (B5) em 2013. Os prazos para introdução progressiva foram antecipados; em janeiro de 2010 já passou a vigorar a mistura de 5% (B5). Em função da exigência legal, a produção brasileira de biodiesel obteve grande crescimento nos últimos anos. Em 2008 a produção foi de pouco mais de 1 milhão de m³, passando para cerca de 1,5 milhões de m³ no ano seguinte; em 2012 a produção chegou a aproximadamente 2,8 milhões de m³ (ANP, 2013).

Diversas matérias-primas podem ser utilizadas para fabricação de biodiesel. No Brasil, no ano de 2012, a soja teve participação mensal média de 75,2% e a gordura bovina 17,2% (ANP, 2012). Nos seis primeiros meses de 2013 a participação média mensal da soja foi de 74,4% e da gordura bovina 19,3% (ANP, 2013).

1.2 OBJETIVO

Diante do exposto, o presente trabalho tem o objetivo geral de verificar a viabilidade de utilização da Avaliação Consequencial do Ciclo de Vida como um método holístico de avaliação de impacto de produtos, que permite incluir os efeitos indiretos causados ao meio ambiente.

Os objetivos específicos são: apresentar e aplicar o método de Avaliação Consequencial do Ciclo de Vida para a identificação de áreas afetadas, direta e indiretamente, pelo aumento da produção agrícola para produção de biodiesel no Brasil. O horizonte de tempo adotado será o ano de 2030. Ao final do estudo, além do resultado do inventário de uso do solo, serão relacionados os pontos fortes e limitações do método como ferramenta para a avaliação do desempenho ambiental de produtos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

- No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica. Primeiramente, o capítulo trata das emissões de gases de efeito estufa no Brasil e no mundo. Em seguida são apresentados dados acerca da produção de biodiesel no Brasil e cenários para a demanda futura. Por último, o capítulo trata da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta para avaliação ambiental de produtos e serviços, com ênfase na diferenciação entre as duas abordagens principais: atribucional e consequencial.
- No capítulo 3 a Avaliação Consequencial do Ciclo de Vida é apresentada como um método possivelmente adequado para a avaliação do uso agrícola do solo, destacando-se que o método possui a importante característica de levar em conta os efeitos indiretos.
- Nos capítulos 4 e 5 são mostrados, respectivamente, os resultados e as considerações finais do estudo consequencial do uso do solo, com foco na identificação de áreas afetadas pelo aumento na demanda do biodiesel no Brasil. Também é feita uma avaliação da metodologia empregada no estudo, apontando seus pontos positivos e negativos, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PANORAMA DAS EMISSÕES DE GEE NO BRASIL E NO MUNDO

O clima na Terra é regulado pelo fluxo de energia solar que atravessa a atmosfera em direção à superfície. Parte dessa energia é devolvida pela Terra na forma de radiação infravermelha que se propaga em direção à atmosfera. Os gases de efeito estufa são gases presentes na atmosfera, que têm a propriedade de bloquear a saída de parte dessa radiação. Muitos desses gases, entre eles o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), existem naturalmente na atmosfera e são essenciais para a manutenção da vida no planeta. Sem os gases estufa a Terra seria, em média, 30°C mais fria. Contudo, como consequência das atividades humanas, também chamadas de atividades antrópicas, a concentração dos gases estufa vem aumentando consideravelmente na atmosfera, o que eleva a temperatura média no planeta. Além dos já citados, há outros gases causadores de efeito estufa, tais como os gases que contêm flúor na sua composição, também conhecidos como gases-F: clorofluorcarbonos (CFC), hidrofluorcarbonos (HFC), hidrofluorclorocarbonos (HCFC), perfluorcarbonos (PFC) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) (IPCC¹, 1995, 1997 *apud* MCT, 2004).

Desde o início da era industrial a concentração de CO₂ na atmosfera vem aumentando de forma contínua. A concentração em 2010 chegou a 388,5 partes por milhão (ppm), muito superior à concentração de 1850, que era de aproximadamente 285 ppm. (UNEP, 2012). De acordo com UNEP (2012), o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera coincide com o aumento da temperatura da superfície do planeta. A década de 2000-2009 foi a década mais quente já registrada no mundo.

A humanidade está sendo afetada de várias formas pelas mudanças climáticas. Alguns exemplos de problemas diretos são: alterações na disponibilidade de água doce, na produtividade agrícola e problemas para a saúde humana. Os seres humanos também estão sendo afetados indiretamente pelos impactos sociais

¹ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for the National Greenhouse Gas Inventories**. Bracknell, 1995.
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Revised 1996 Guidelines for the National Greenhouse Gas Inventories**. Bracknell, 1997.

e econômicos provocados pela perda da biodiversidade e dos serviços prestados pelos ecossistemas (UNEP, 2012).

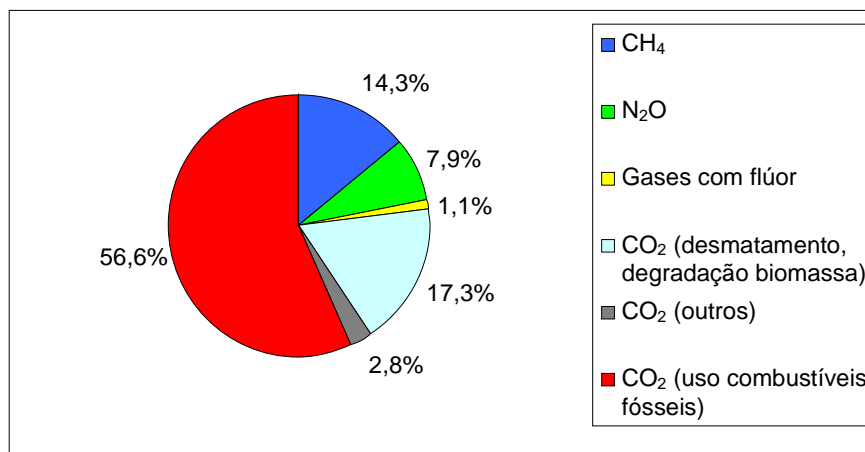


Figura 1 - Emissões mundiais antrópicas de GEE em 2004, em CO₂ eq.²

Fonte: IPCC (2007)

A partir da Figura 1, em que se apresenta a contribuição de cada GEE no aquecimento global, percebe-se que o CO₂ é o mais significativo, sendo a queima de combustíveis fósseis a atividade que mais contribui para emissão desse gás.

Conforme último relatório do IPCC³ (2007, *apud Cerri et al.*, 2009), o setor agrícola era responsável por aproximadamente 14% das emissões antrópicas mundiais de GEE. Havia a expectativa, de acordo com o relatório, de que a participação desse setor aumentasse cada vez mais, principalmente em decorrência do crescimento populacional e da renda. O relatório apontou o desmatamento como responsável por 17% das emissões, fazendo com que a contribuição total desses dois setores atingisse aproximadamente um terço das emissões mundiais totais. A partir desses dados conclui-se que essas duas fontes emissoras devem receber muita atenção.

No Brasil, o primeiro levantamento das emissões e absorções nacionais de GEE foi publicado em 2004 no relatório denominado “Comunicação Nacional Inicial

² Para efeito de comparação entre os diferentes gases causadores de efeito estufa, o IPCC (2007) converte a massa dos mesmos usando fatores que representam o Potencial de Aquecimento Global (GWP da sigla em inglês para *Global Warming Potential*) de cada um em relação a um gás de referência, que é o CO₂. Com isso, cada gás passa a ser representado em termos de CO₂ equivalente (CO₂ eq.) (IPCC, 2007).

³ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Assessment Report 4**. Geneva, 2007.

do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima”. Esse relatório foi publicado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) e baseado em metodologias do IPCC, compreendendo o período 1990-1994 (MCT, 2004). Em 2010 foi publicado o segundo relatório (Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima), mostrando dados sobre as emissões de GEE no Brasil no período 1990-2005 (MCT, 2010).

Ao contrário do relatório apresentado pelo IPCC (2007), o inventário nacional realizado pelo MCT (2010) não utiliza o Potencial de Aquecimento Global para agregação dos GEE. A opção de agregar as emissões em unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq.) em um horizonte de tempo de 100 anos não foi adotada pelo Brasil, que relatou suas emissões apenas em unidades de massa de cada gás de efeito estufa, conforme apresentado no seu Inventário Inicial. Na visão do Brasil, o Potencial de Aquecimento Global não representa de forma adequada a contribuição relativa dos diferentes gases de efeito estufa à mudança do clima, pois enfatiza de modo errôneo a importância dos gases com curtos períodos de permanência na atmosfera, como é o caso do metano.

Na Tabela 1 são apresentados alguns resultados da Segunda Comunicação Nacional (MCT, 2010). A tabela compara as emissões, por setor, em 1990 e 2005 dos quatro gases com maior participação em massa: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e o monóxido de carbono (CO). O levantamento completo pode ser consultado no APÊNDICE A.

Tabela 1 - Evolução das emissões de GEE no Brasil, em Gg

Setor	CO ₂			CH ₄			N ₂ O			CO		
	1990	2005	var. (%)	1990	2005	var. (%)	1990	2005	var. (%)	1990	2005	var. (%)
Mudança no uso do solo e florestas	766.493	1.258.626	64	1.996	3.045	53	13,7	20,9	53	17.468	26.641	53
Energia	179.948	313.695	74	427	541	27	8,5	12,1	42	14.919	11.282	-24
Agropecuária	0	0	0	9.539	12.768	34	334	476	43	2.543	2.791	10
Processos industriais	45.265	65.474	45	5,1	9,2	80	10,7	22,8	113	365	626	72
Tratamento de resíduos	24	110	358	1.227	1.743	42	9	14	56	0	0	0
Total	991.730	1.637.905	65	13.194	18.106	37	375,9	545,8	45	35.295	41.340	17

Fonte: Adaptado de MCT (2010)

Conclui-se, a partir da Tabela 1, que o CO₂ é o principal GEE no Brasil e o setor Mudança do Uso do Solo e Florestas é o principal emissor, em massa, deste

gás. Estão incluídos nesse setor: as emissões e remoções de GEE decorrentes do desmatamento da vegetação nativa, das mudanças na floresta e outros estoques de biomassa lenhosa, do abandono de áreas anteriormente manejadas e dos respectivos solos onde ocorrem as mudanças anteriormente mencionadas. Também é possível observar que o setor de Energia, representado principalmente pela queima de combustíveis fósseis, tem participação muito significativa nas emissões brasileiras. É o segundo que mais emite GEE e sofreu um aumento significativo no período analisado, o que demonstra a importância de medidas para frear esse crescimento, sem, contudo, transferir as emissões para outros setores.

Para Cerri *et al.* (2009), a maioria dos esforços para mitigação de emissões de GEE no Brasil tem focado sobretudo nos dois principais setores emissores: Energia e Mudança no Uso do Solo e Florestas. Com relação ao primeiro, os programas e medidas adotados a partir dos anos 1990, como a utilização dos carros *flex-fuel*, têm proporcionado muitos benefícios para a economia brasileira e vêm ajudando a reduzir as emissões de carbono em relação ao que era usualmente praticado. Apesar disso, o setor ainda apresenta elevado incremento de emissões. Quanto ao segundo, houve algum êxito, tendo em vista a queda no aumento da taxa de desmatamento a partir do ano 2000, mas muito ainda precisa ser feito para reduzir as emissões.

Ainda de acordo com Cerri *et al.* (2009), além dos esforços já praticados para restringir as emissões do setor de energia e do desmatamento, uma oportunidade seria implantar um programa nacional para incentivar medidas de mitigação na agropecuária. Essas medidas não deveriam focar somente na redução de emissões, mas também no aumento das remoções (seqüestro de carbono). Duas importantes estratégias nesse sentido são: a aplicação do plantio direto na agricultura e a intensificação da pecuária.

O plantio direto pode ser definido como um sistema de produção agrícola onde não há preparo do solo, seja aração ou outro procedimento, entre uma colheita e o plantio seguinte, exceto pela aplicação de fertilizante (JANTALIA *et al.*, 2006; CERRI *et al.*, 2007; CERRI *et al.*, 2009). Conforme Lal⁴ (1997, *apud* Jantalia *et al.*, 2006), como no plantio direto, ao contrário do método tradicional, o solo é mantido intacto, evita-se a decomposição e a oxidação do carbono nele contido. Desse

modo, o plantio direto é fundamental para a mitigação das emissões de CO₂ na agricultura, evitando a liberação de carbono e permitindo o acúmulo de matéria orgânica no solo. No Brasil, o sistema de plantio direto vem sendo adotado em maior escala a partir da década de 1990 (JANTALIA *et al.*, 2006). A área cultivada nesse sistema é próxima de 21 milhões de hectares, o que representa cerca de 40% da área plantada de grãos (FEBRAPDP⁵, 2005 *apud* JANTALIA *et al.*, 2006).

Já a pecuária bovina, de acordo com Cerri *et al.* (2009), ocorre no país de forma extensiva e muito ineficiente, com ocupação média dos pastos extremamente baixa em comparação com outros países. A modernização da pecuária bovina resultaria em ganhos de produtividade e, conseqüentemente, menores emissões de GEE decorrentes da ocupação de áreas. Entretanto, para Lapola *et al.* (2009), esse processo de modernização encontra barreiras. A aquisição de gado é subsidiada no Brasil, especialmente na Amazônia, mas poucos incentivos são fornecidos para a recuperação de pastos degradados e intensificação das pastagens. Além disso, em muitos casos a densidade da pecuária é mantida intencionalmente em um nível mínimo somente para garantir a posse sobre terras públicas.

Com os dados apresentados nessa seção foi possível perceber que os setores ligados ao biodiesel produzido a partir de produtos agrícolas são importantes emissores de GEE. Por um lado, é um recurso energético que normalmente figura como uma alternativa para reduzir as emissões do setor de energia - o maior emissor mundial e um dos principais emissores no Brasil. Adicionalmente, esse produto depende do uso do solo, que também vem provocando emissões, seja na agricultura, na pecuária ou com desmatamentos.

2.2 ALGUNS DADOS ACERCA DO BIODIESEL NO BRASIL

Alguns aspectos importantes acerca do biodiesel no Brasil serão descritos nesta seção: processo industrial adotado no país, capacidade instalada e ociosidade nas usinas de biodiesel, o sistema de leilões, algumas iniciativas para melhorar a sustentabilidade da soja e o selo combustível social para o biodiesel.

⁴ LAL, R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. **Soil and Tillage Research**, n. 43, p. 81-107, 1997.

⁵ Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (FEBRAPDP). Ponta Grossa, Paraná, Brasil. 2005. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/area_PD_Brasil_2005.html>. Acesso em 20/12/2005>.

2.2.1 Processo industrial

O biodiesel é tradicionalmente obtido por meio da reação de óleos vegetais com um álcool e um catalisador, processo conhecido como transesterificação, que resulta em biodiesel e glicerina (EPE, 2007).

A escolha do tipo de álcool para a reação determina a rota tecnológica: a rota metílica, que utiliza o metanol, e a rota etílica, que adota o etanol. A rota etílica oferece uma pequena vantagem de rendimento, mas os custos da rota metílica tem se mostrado vantajosos, razão pela qual a preferência das usinas de biodiesel do mundo todo é pelo metanol. No Brasil, mais de 80% das usinas adotam a rota metílica e a contribuição dessas usinas para a produção é ainda mais relevante, com um percentual de aproximadamente 90% do biodiesel produzido. O uso de etanol, contudo, pode ser interessante caso sejam instaladas plantas de biodiesel junto a usinas produtoras de álcool (CASTRO; LIMA; SILVA, 2010).

Com relação ao catalisador, Castro, Lima e Silva (2010) afirmam que há dois grandes grupos de catálise: catálise homogênea e catálise heterogênea. A primeira é realizada com o emprego de catalisadores básicos (hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH), Metóxido, Etóxido) ou catalisadores ácidos (Ácidos Sulfúrico, Sulfônico, Fosfórico, Clorídrico). A segunda pode ser enzimática, com resinas iônicas ou sem catalisador. De acordo com Rothkopf⁶ (2007 *apud* Castro, Lima e Silva, 2010), a catálise homogênea com KOH é a predominante em todo mundo porque a reação é mais rápida.

2.2.2 Capacidade instalada

A produção de biodiesel envolve um conjunto complexo de organizações. Desse sistema industrial fazem parte: fornecedores de insumos, produtores agrícolas, processadores de grãos e as usinas de biodiesel (CASTRO; LIMA; SILVA, 2010). No ano de 2012 o Brasil apresentou uma capacidade instalada para produção anual de aproximadamente 7 milhões de m³ de biodiesel (ANP, 2013).

⁶ ROTHKOPF, G. **The global biofuels outlook 2007**. A blueprint for green energy in the Americas, Inter-American Development Bank. NBB Reports Database. National Biodiesel Board. Disponível em: <www.biodiesel.org>. Acesso em: ago. 2009.

2.2.3 Leilões de biodiesel

A ANP realiza, desde 2005, os leilões de biodiesel. Nos leilões, as refinarias compram o biodiesel para misturá-lo ao diesel derivado do petróleo. O objetivo inicial dos leilões foi gerar mercado e, desse modo, estimular a produção de biodiesel em quantidade suficiente para que refinarias e distribuidores pudessem compor a mistura determinada por lei. Os leilões continuam sendo realizados para assegurar que todo o óleo diesel comercializado no país contenha o percentual de biodiesel obrigatório (ANP, 2010).

2.2.4 Sustentabilidade da soja

Sendo a soja a principal matéria-prima para produção de biodiesel no Brasil, cabe mencionar as iniciativas voltadas para melhoria do desempenho socioambiental desse produto agrícola no país.

Como consequência das exigências do mercado, especialmente o europeu, com relação à sustentabilidade da soja, tem havido uma busca por parte dos produtores, processadores e exportadores para que a expansão da produção de soja aconteça em conformidade com as leis nacionais (THE NATURE CONSERVANCY, 2012). De acordo com a mesma fonte, alguns mecanismos vêm sendo utilizados com esse objetivo. Entre eles, no caso específico da soja no Brasil, pode-se citar as iniciativas de boas práticas agrícolas e os compromissos e/ou acordos.

As boas práticas agrícolas são um conjunto de princípios, normas e recomendações técnicas aplicadas à produção, ao processamento e ao transporte de insumos, matérias-primas e produtos, com a finalidade de proteger o meio ambiente e melhorar as condições sociais das pessoas envolvidas na cadeia produtiva. Nessa linha, alguns dos programas de grande destaque no cenário agrícola nacional são: o Soja Plus e o Soja Mais Verde. O Soja Plus – Programa de Gestão Econômica, Social e Ambiental da Soja Brasileira – é organizado pela Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE), pela Associação Nacional dos Exportadores de Cereais (ANEC), pela Associação dos Produtores de Soja e Milho de Mato Grosso (APROSOJA) e pelo Instituto para o Agronegócio Responsável (ARES). É um programa que promove e implementa ações em parceria

com produtores rurais, governo, sociedade civil, indústria, comércio e instituições de pesquisa, ensino e extensão. O Soja Plus dispõe de cinco linhas de ação: qualidade de vida no trabalho, melhores práticas de produção e serviço, viabilidade financeira e econômica, qualidade do produto e responsabilidade social. Os produtores rurais cadastrados no programa recebem orientação técnica sobre as melhores práticas agrícolas e gestão da propriedade rural, além de poderem participar de treinamentos e trocar de experiências com outros produtores rurais. Já o Projeto Soja Mais Verde é uma iniciativa do Governo do Estado de Mato Grosso, da Associação dos Produtores de Soja do Estado de Mato Grosso (APROSOJA) e da organização não-governamental The Nature Conservancy, em parceria com as prefeituras municipais e outras entidades. Tem como objetivo assegurar a produção sustentável da soja no Estado de Mato Grosso por meio do mapeamento e regularização ambiental das propriedades rurais. Paralelamente, busca recuperar áreas degradadas e zerar o cultivo de soja nas Áreas de Proteção Permanente (APP), que incluem nascentes, olhos d'água, chapadões, margem de rios, entre outros (THE NATURE CONSERVANCY, 2012).

Os compromissos e/ou acordos, nesse contexto, são instrumentos de consenso entre governos, organizações da sociedade civil, empresas, produtores e demais agentes do setor que visam à adoção de práticas para a promoção da sustentabilidade (THE NATURE CONSERVANCY, 2012). Um importante compromisso visando promover a sustentabilidade da cadeia produtiva da soja no Brasil é a Moratória da Soja, iniciada em julho de 2006, quando as empresas ligadas à Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE) e à Associação Brasileira dos Exportadores de Cereais (ANEC) se comprometeram a não comercializar soja oriunda de áreas desmatadas da Amazônia. Além de comprar a soja, essas *traders* também financiam o produtor rural. Com isso, essas empresas, que respondem por 90% da soja comercializada no país, possuem grande poder para pressionar produtores a não desmatar. Levantamentos realizados após o primeiro ano da moratória constataram que não houve desmatamento para plantio de soja. Há necessidade, contudo, de monitoramento constante para verificar a eficácia do acordo (BALAZINA, 2008). Como parte da operacionalização da Moratória da Soja, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) identifica as áreas desmatadas por imagens de satélites. São também realizados sobrevoos para

identificação do uso e da ocupação do solo na Amazônia (THE NATURE CONSERVANCY, 2012).

2.2.5 Sustentabilidade do biodiesel fabricado a partir da soja

De acordo com Mourad (2008), para cada unidade de energia fóssil consumida na produção de biodiesel no Brasil, são obtidas três unidades de energia renovável. Esse número é bem inferior ao obtido pelo etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, que é de aproximadamente 9,3. Conforme a mesma autora, embora um dos objetivos do PNPB seja a redução da dependência do diesel, a cadeia produtiva para a produção de biodiesel usa o diesel para operação dos equipamentos agrícolas e no transporte, o que resulta num consumo de aproximadamente 0,6 toneladas de diesel para cada tonelada de biodiesel produzido. Com isso, o uso do biodiesel aumenta o consumo do próprio diesel. Assim, o B2 na realidade equivale ao B 0,82 e o B5 equivale ao B 2,04.

Cavalett e Ortega (2010) chegaram à conclusão de que, apesar da possibilidade de uma contribuição no sentido de reduzir as emissões de CO₂, o biodiesel derivado da soja, não é uma opção viável. Os poluentes diretos (fertilizantes, agroquímicos e pesticidas) e outros impactos ambientais (elevada demanda por recursos, como energia, água e solo), em relação à energia líquida fornecida, indicam que o biodiesel de soja provoca elevado impacto ambiental. De acordo com os autores, o biodiesel da soja não pode ser considerado um recurso energético totalmente renovável, visto que a produção é fortemente dependente do uso de recursos não renováveis durante a etapa agrícola, o transporte e o processamento industrial, de modo que a fração do combustível que é realmente renovável é muito baixa (cerca de 30%). A produção agrícola é a fase mais importante porque utiliza a maior quantidade de recursos e, portanto, a que demanda mais atenção para o desenvolvimento de políticas públicas. Se cuidados nesse sentido não forem tomados, a exploração intensiva do solo e o uso de combustíveis fósseis para produção de biodiesel provavelmente gerarão mais danos do que benefícios socioambientais.

Nogueira (2010) afirma que os impactos do biodiesel dependem de uma série de fatores. Para o autor, os biocombustíveis tem um papel crucial a cumprir no longo prazo, ajudando a limitar o crescimento das emissões de GEE e liderando a

transição dos atuais combustíveis derivados do petróleo para formas de energia mais sustentáveis. Diante disso, diversos países estão investindo na produção de biocombustíveis e, em alguns casos, com excelente perspectiva. Para proporcionar um melhor entendimento das potencialidades e limites dos biocombustíveis, particularmente o biodiesel, é muito importante o desenvolvimento detalhado de estudos de ciclo de vida, considerando processos atuais e futuros, avaliando diferentes matérias primas e sistemas produtivos. Diferentes metodologias de análise podem ser empregadas visando produzir estudos de ciclo de vida mais realistas. Para Nogueira e Capaz (2013), os biocombustíveis são consideravelmente diferentes em termos de matérias-primas, rotas de processamento, custos e benefícios, de modo que a melhor opção varia conforme cada situação específica. Com isso, conclui-se que não é possível generalizar que um determinado biocombustível é bom ou ruim; há necessidade de avaliar cada caso.

2.2.6 Selo combustível social para o biodiesel

Conforme IPEA (2010), o selo é uma identificação concedida pelo Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA) às indústrias de biodiesel que adquirem matéria-prima de agricultores familiares. Por meio deste selo a indústria conta com reduzidas alíquotas de PIS/PASEP e Cofins. Além disso, o selo permite acesso a melhores condições de financiamento público.

Ainda de acordo com IPEA (2010), após as alterações feitas pelo MDA, em fevereiro de 2009, a certificação é concedida aos produtores que comprarem matéria-prima da agricultura familiar em percentual mínimo de 10% até a safra 2009/2010 e 15% a partir da safra 2010-2011, para as aquisições provenientes das regiões Norte e Centro-Oeste, e 30% para as aquisições provenientes das regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Semiárido, a partir da data de 25/02/2009. É também exigido que se façam contratos negociados entre as indústrias e os agricultores familiares. Exige-se ainda das indústrias que assegurem assistência e capacitação técnica aos agricultores familiares.

A conclusão apresentada por IPEA (2010) é que o selo não tem atingido o objetivo, que é a inclusão social, principalmente nas regiões Norte e Nordeste. Nessas regiões tem havido quebra de contratos de fornecimento, de assistência técnica e de aquisição de matéria-prima. Embora importante para viabilizar o sistema

de produção, o Selo Combustível Social tem sido um mecanismo de incentivo para a indústria, mas não de efetiva inclusão social. Em 2009, 92% das indústrias contavam com o selo, sobretudo por meio da compra de soja de agricultores do Centro-Oeste classificados como familiares. Isso ocorre porque não há grande diferença entre a redução de impostos para o caso de compras de dendê e mamona feitas nas regiões Norte e Nordeste (isenção de PIS/PASEP e Cofins) e os demais casos previstos no regulamento (89,6% de redução de PIS/PASEP e Cofins para os casos de outras matérias-primas nas regiões Norte e Nordeste ou qualquer matéria-prima proveniente das outras regiões do país). Desse modo, não é economicamente vantajoso levar assistência técnica a sistemas familiares em regiões longínquas. Por isso, outros mecanismos mais eficientes devem ser pensados para uma efetiva inclusão social nas regiões mais necessitadas.

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental e os possíveis impactos associados aos produtos⁷ têm aumentado o interesse por métodos para compreender e lidar com esses impactos. Uma das técnicas com esse objetivo é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (ABNT, 2006a, 2006b).

Conforme Curran (2006), a ACV leva em conta o ciclo de vida completo do produto, por isso é conhecida como uma abordagem “do berço ao túmulo” para avaliação ambiental de sistemas industriais. Todas as fases devem ser consideradas, desde a obtenção da matéria-prima, passando pela manufatura, uso, manutenção, e outras fases, até o descarte final.

De acordo com Finkbeiner *et al.* (2006) e ABNT (2006a), os seguintes princípios fundamentais devem ser usados como guia para decisões relacionadas com o planejamento e execução de uma ACV:

- a) perspectiva de ciclo de vida: ACV considera o ciclo de vida completo de um produto, desde a extração da matéria-prima até o descarte final. Por meio dessa abordagem a transferência de cargas ambientais⁸ entre

⁷ Neste trabalho, o termo “produto” refere-se também a serviços, da mesma forma que nas normas ABNT ISO 14040 e 14044.

⁸ Carga ambiental é definida como a demanda por recursos, emissões de poluentes e resíduos gerados por determinada atividade tecnológica (EKVALL; FINNVEDEN, 2001).

estágios do ciclo de vida ou entre processos individuais pode ser identificada;

- b) foco ambiental: ACV trata de aspectos⁹ e impactos ambientais de um sistema de produto. Aspectos e impactos econômicos e sociais estão, normalmente, fora do escopo de uma ACV. Outras ferramentas, no entanto, podem adotar o conceito de ciclo de vida para avaliação dessas questões;
- c) abordagem relativa e unidade funcional: ACV é uma abordagem relativa, que é estruturada sobre uma unidade funcional. A unidade funcional quantifica a função do produto estudado. Todas as análises subsequentes são relativas à unidade funcional, como o consumo de materiais e energia e as emissões para o ar, para o solo e para a água. Conseqüentemente, o impacto resultante identificado pelo estudo também estará relacionado com a unidade funcional;
- d) abordagem iterativa: ACV é uma técnica iterativa; à medida que dados e informações são coletados, pode haver a necessidade de reavaliar etapas anteriores visando atender ao objetivo do estudo;
- e) transparência: devido à inerente complexidade dos estudos de ACV, a transparência é um importante princípio a fim de assegurar a correta interpretação dos resultados;
- f) abrangência: ACV considera aspectos do ambiente natural, saúde humana e uso de recursos, razão pela qual podem ocorrer *trade-offs*. Com isso, diferentes perspectivas devem ser identificadas e avaliadas para a tomada de decisão;
- g) abordagem científica: decisões em ACV devem, preferencialmente, fundamentar-se nas ciências naturais. Caso isso não seja possível, outras abordagens científicas podem ser utilizadas (por exemplo, ciências sociais ou econômicas). Somente se não houver possibilidade de abordagem científica, as decisões podem ser baseadas em julgamento de valor.

⁹ Aspecto ambiental é o elemento das atividades, produtos ou serviços que pode interagir com o meio ambiente (ABNT, 2006a, 2006b), por exemplo, a emissão de CO₂. A mudança climática que essa emissão causa é o impacto ambiental.

2.3.1 Normas para ACV

O desenvolvimento de normas internacionais foi um importante marco para consolidar os procedimentos e métodos de ACV. Esse passo foi fundamental para a aceitação geral da ACV na comunidade internacional (FINKBEINER *et al.*, 2006).

As normas fornecem requisitos e recomendações que servem como guia e asseguram transparência aos estudos de ACV. A comparação dos resultados de diferentes estudos só é possível se os pressupostos e o contexto de cada estudo são equivalentes (ABNT, 2006a, 2006b).

De acordo com Guinée *et al.* (2001), em 1994 a *International Standardization Organization* (ISO) estabeleceu um Comitê Técnico encarregado de elaborar as normas para ACV. Foram criadas quatro normas:

- a) ISO 14040 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura;
- b) ISO 14041 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Definição de objetivo e escopo e análise de inventário;
- c) ISO 14042 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Avaliação do impacto do ciclo de vida;
- d) ISO 14043 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Interpretação do ciclo de vida.

Finkbeiner *et al.* (2006) informam que a partir de 2001 a ISO iniciou um trabalho para identificar áreas de melhoria nas normas de ACV. Os objetivos da revisão foram: resumir, melhorar a clareza e corrigir inconsistências, mantendo o conteúdo técnico inalterado.

Como resultado, o conteúdo das quatro normas antigas foi agrupado em apenas duas:

- a) ISO 14040:2006 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura;
- b) ISO 14044:2006 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

Conforme Finkbeiner *et al.* (2006), a nova ISO 14040 visa apresentar os princípios e a estrutura da ACV de uma forma simples, para que todos os interessados, não apenas especialistas, possam compreender. A nova norma ISO

14044, por sua vez, apresenta o detalhamento técnico mais aprofundado, destinado principalmente para profissionais da área.

Um estudo completo de ACV possui quatro etapas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. A descrição e os conceitos básicos de cada uma das etapas são apresentados em detalhes no APÊNDICE B.

2.4 AS ABORDAGENS DE ACV: ATRIBUCIONAL E CONSEQUENCIAL

De acordo com Curran, Mann e Norris (2005) e Weidema e Ekvall (2009), existem duas diferentes abordagens em ACV:

- a) atribucional: considerada do tipo *status quo*, descritiva ou contábil, tem o objetivo de atribuir a um produto, fabricado em um dado momento, uma parcela das emissões totais de poluentes e do consumo de recursos na economia. Nela os principais fluxos de materiais do sistema de produto de interesse são descritos desde a extração da matéria-prima até a disposição dos resíduos;
- b) conseqüencial: considerada uma abordagem orientada ao efeito ou à mudança, tem o objetivo de estimar como os fluxos de materiais e poluentes mudarão como resultado de decisões que resultam em mudanças. A mudança¹⁰, ou decisão, aqui mencionada, refere-se a uma alteração nas condições iniciais do sistema de produto de interesse. Essa alteração conduz a conseqüências no sistema de interesse e fora dele, por meio de cadeias de causa-efeito.

A Figura 2 auxilia na compreensão das principais diferenças entre as duas perspectivas de ACV.

¹⁰ Nesse contexto, são exemplos de mudança: a instalação de um novo equipamento, entrada em vigor de uma legislação mais rígida, um aumento na demanda, etc. (CURRAN; MANN; NORRIS, 2005).

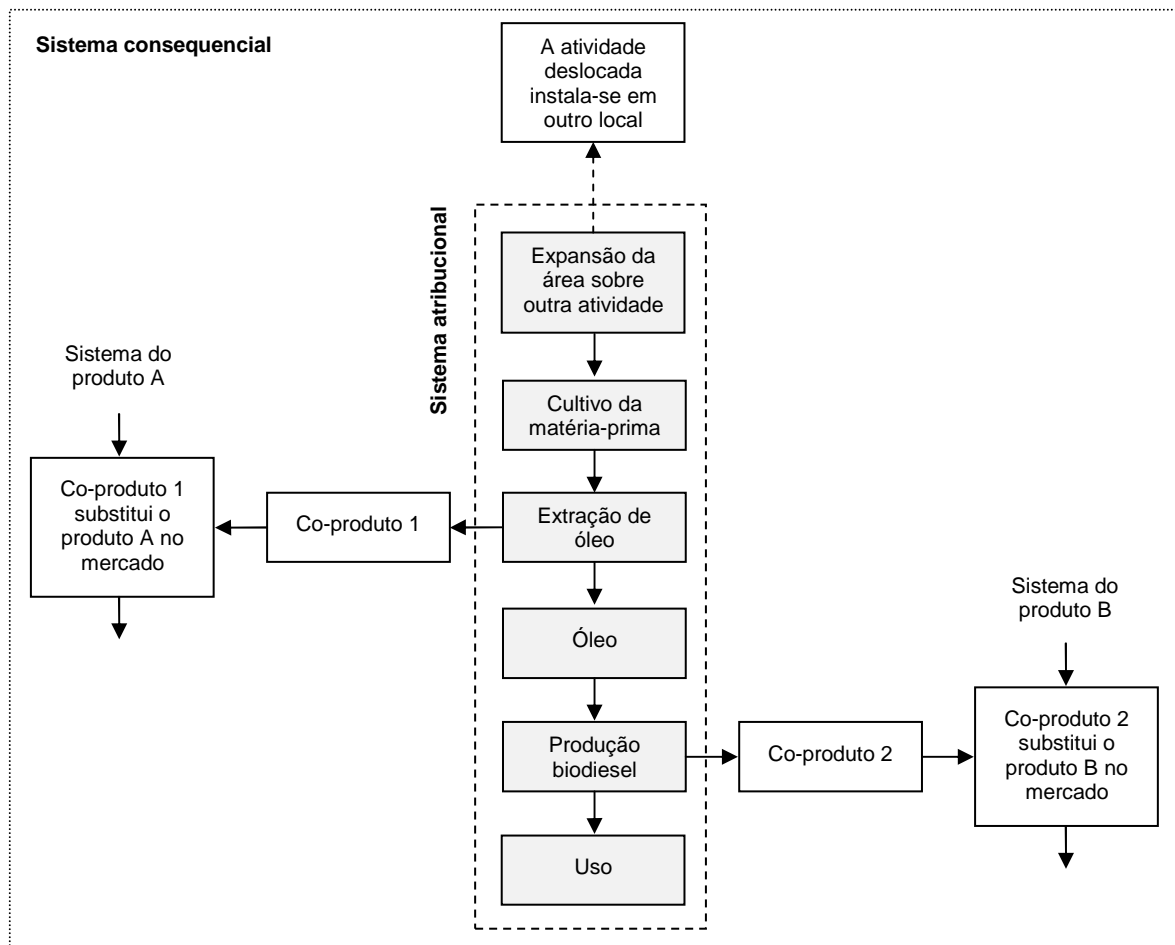


Figura 2 – ACV atribucional e consequencial
Fonte: Adaptado de Reinhard e Zah (2009)

A Figura 2 mostra o ciclo de vida simplificado do biodiesel fabricado a partir de produtos agrícolas. Um estudo atribucional foca exclusivamente no ciclo de vida do biodiesel, contabilizando todos seus fluxos. Por outro lado, um estudo consequencial incluiria todas as unidades de processo afetadas por uma mudança, ainda que estejam fora do ciclo de vida do biodiesel. As unidades de processo não afetadas pela mudança, mesmo estando dentro do sistema de produto, não são de interesse do estudo consequencial. Considerando o exemplo da Figura 2, uma mudança poderia ser um aumento na demanda de biodiesel. Nesse caso, além dos processos afetados dentro do ciclo de vida do biodiesel, a análise consequencial deve levar em conta o aumento na produção dos co-produtos 1 e 2 e seus impactos no mercado, substituindo produtos concorrentes. Deve incluir, também, a atividade que foi deslocada pela agricultura e que pode, por exemplo, causar desmatamento para repor a área perdida. Conforme Ekvall e Finnveden (2001), esse tipo de estudo

inclui os chamados efeitos indiretos. No contexto de ACV, efeitos indiretos são efeitos sobre a carga ambiental de atividades localizadas fora do ciclo de vida investigado, decorrentes de mudanças ocorridas dentro do ciclo de vida investigado.

Ambas as abordagens podem ser aplicadas tanto ao ICV quanto ao AICV. Para Weidema e Ekvall (2009), a maior parte dos atuais modelos de AICV é consequencial, pois modelam as conseqüências de uma unidade adicional de determinada emissão. As abordagens normalmente se aplicam, portanto, à fase de inventário.

Conforme Curran, Mann e Norris (2005), a ACV atribucional é mais conhecida e utilizada. Por essa razão, é muitas vezes tratada como a maneira tradicional de fazer ACV. Para Tillman (2000), a dificuldade de distinguir entre estas duas perspectivas tem causado muita controvérsia entre os especialistas. De acordo com essa autora, a escolha entre uma ou outra abordagem deve estar de acordo com o objetivo do estudo e não deve, portanto, ser arbitrária. O objetivo de um estudo de ACV varia conforme a necessidade e o ponto de vista das partes interessadas. Desse modo, o conhecimento de ambas as perspectivas é essencial para que a mais adequada seja aplicada a cada caso.

A seguir são apresentados os pontos de vista éticos que levam à escolha de uma ou outra abordagem de ACV.

2.4.1 Fundamentos éticos

Como mencionado anteriormente, as abordagens atribucional e consequencial para ACV possuem diferentes objetivos. A primeira visa gerar informação ambiental acerca do ciclo de vida investigado; a segunda tem o objetivo de determinar as conseqüências de mudanças no sistema de produto de interesse, levando-se em conta conseqüências tanto dentro quanto fora do ciclo de vida de interesse.

A escolha entre uma das abordagens baseia-se em diferentes percepções acerca do que é uma ação ambientalmente correta. Para analisar essas diferentes percepções é necessário considerar os fundamentos filosóficos dentro da filosofia moral normativa, ou ética normativa (EKVALL; TILLMAN; MOLANDER, 2005; ROSELL; MOISANDER, 2008). A ética normativa é a área dentro da filosofia moral

que analisa quais ações são corretas ou incorretas (NORMAN¹¹, 1998, *apud* EKVALL; TILLMAN; MOLANDER, 2005).

Conforme Ekvall, Tillman e Molander (2005), as teorias dentro da ética normativa dividem-se em: ética teleológica e ética deontológica. Outra classificação também apresenta duas categorias: ética das situações e ética das regras.

De acordo com a ética teleológica, uma determinada decisão é considerada correta quando provoca conseqüências positivas, produzindo o maior benefício possível às pessoas. De uma perspectiva teleológica o meio ambiente não possui valor intrínseco; valor lhe é atribuído na medida em que satisfaz necessidades humanas (ROSELL; MOISANDER, 2008).

A ética deontológica, em contraste, baseia-se em princípios éticos, sendo que estes podem ser bons ou ruins em si mesmos, independentemente das conseqüências da aplicação de um princípio (EKVALL; TILLMAN; MOLANDER, 2005). A deontologia argumenta que cumprir com obrigações e respeitar direitos leva automaticamente a algo bom. No contexto da área ambiental, o meio ambiente possui valor intrínseco, sendo, portanto, uma obrigação moral preservá-lo, independentemente de qualquer tipo de conseqüência (ROSELL; MOISANDER, 2008).

A segunda classificação considera a ética das situações e a ética das regras. A primeira afirma que cada ação individual deveria ser avaliada dentro do contexto específico no qual ocorre. A segunda, por sua vez, defende que cada ação deveria ser avaliada em relação a uma regra ou conjunto de regras (EKVALL; TILLMAN; MOLANDER, 2005). A combinação dessas quatro teorias é mostrada no Quadro 1.

Ética normativa	Ética das situações	Ética das regras
Ética teleológica	Preocupa-se com as conseqüências de ações individuais	Preocupa-se com as conseqüências das regras
Ética deontológica	Preocupa-se com a aplicação de bons princípios a cada situação	Preocupa-se com a aplicação de bons princípios às regras

Quadro 1 – Tipologia de teorias da ética normativa

Fonte: Adaptado de Lübcke¹² (1988, *apud* Ekvall, Tillman e Molander, 2005)

¹¹ NORMAN, R. **The moral philosophers**: an introduction to ethics. New York: Oxford University Press, 1998.

¹² LÜBCKE, P. (Ed.). **Filosoflexikonet**. Stockholm, Sweden: Bokförlaget Forum AB, 1988.

Da combinação dessas categorias, como apresentado pelo Quadro 1, conclui-se que para a ética teleológica das situações, uma ação específica é considerada boa se produz consequências positivas. De acordo com a ética teleológica das regras, as ações são boas na medida em que obedecem às regras que levam a consequências positivas. Por outro lado, na ética deontológica das situações, cada ação é avaliada de acordo com a situação específica na qual ocorre, mas sem julgar se suas consequências são boas ou ruins; o julgamento é feito com base em princípios éticos aplicados à situação específica. Por fim, a ética deontológica das regras valoriza regras cujos princípios éticos são considerados bons, mas não se preocupa com as consequências dessas regras; em outras palavras, a regra possui valor em si mesma.

A partir das teorias éticas, Ekvall, Tillman e Molander (2005) identificaram conexões com as abordagens de ACV, como mostra o Quadro 2.

Tipo de ACV	Informação gerada	Preferência ética	Teoria ética correspondente
ACV atribucional	Informação ambiental acerca do ciclo de vida de interesse	Uma ação ambientalmente correta significa não estar associada a ciclos de vida de alto impacto ambiental	Ética deontológica das regras
			Ética teleológica das regras
ACV consequencial	Conseqüências causadas por mudanças no ciclo de vida de interesse	Uma regra ambientalmente correta tem boas conseqüências para o meio ambiente	Ética teleológica das regras
		Uma ação ambientalmente correta tem boas conseqüências para o meio ambiente	Ética teleológica das situações

Quadro 2 – Conexões entre a ética normativa e ACV

Fonte: Adaptado de Ekvall, Tillman e Molander (2005)

Pode ser observado no Quadro 2 que a ACV atribucional fornece uma avaliação ambiental do ciclo de vida investigado e tal informação é utilizada como critério para escolha de produtos. Nesse caso a decisão é baseada na seguinte regra: evitar o relacionamento com produtos que possuem impactos ambientais indesejáveis. Quando tal regra é adotada sem que se faça referência às suas

conseqüências, esse é um caso de ética deontológica aplicada às regras, uma vez que a regra tem valor em si mesma. Porém, caso haja a expectativa de que essa regra produza conseqüências positivas, então esse seria um caso de ética teleológica aplicada às regras. Um exemplo para melhor ilustrar esses dois casos seria a preferência por produtos com selo ambiental. Na primeira situação, o consumidor opta pelo produto com selo simplesmente porque ele deseja manter uma relação comercial com produtos cujos sistemas de produto são ambientalmente melhores. No segundo caso, o consumidor também opta pelo produto rotulado, mas espera que, em razão da sua atitude, outros fabricantes melhorem os seus produtos, o que levaria a boas conseqüências para o meio ambiente. Em ambos os casos o consumidor preocupa-se apenas com o ciclo de vida do produto em questão, não com conseqüências em outros ciclos de vida decorrentes da sua decisão.

Percebe-se, também, observando o Quadro 2, que é mais adequado utilizar uma ACV conseqüencial quando se busca avaliar uma decisão de acordo com as conseqüências provocadas por essa decisão. Caso o objeto de estudo seja uma situação específica, trata-se de um caso de ética teleológica aplicada às situações. Se o estudo visa avaliar as conseqüências de uma regra, já existente ou ainda em fase de estudos, tem-se um caso de ética teleológica aplicada às regras. Um exemplo de estudo conseqüencial baseado na ética teleológica das situações seria uma avaliação das conseqüências diretas e indiretas provocadas pela decisão de utilizar etanol em lugar de gasolina. E, por último, um exemplo de ética teleológica aplicada às regras pode ser a decisão governamental de alterar o percentual de mistura obrigatória de biodiesel no diesel derivado do petróleo.

Um ponto interessante a ser destacado é que os autores relacionam a ética teleológica aplicada às regras a ambas as abordagens de ACV. Isso parece uma inconsistência, no entanto os autores interpretaram que há uma diferença sutil de pontos de vista a partir dessa mesma categoria ética. No caso do estudo atribucional, o consumidor assume a obediência à regra como prioridade e considera que essa atitude estimula os concorrentes do produto em questão a também buscarem a melhoria ambiental, sem preocupação com conseqüências em outros ciclos de vida. Já no caso conseqüencial, a preocupação é com as conseqüências da regra em si, onde a questão é: essa regra é boa ou ruim considerando suas conseqüências gerais no meio ambiente, dentro e fora do ciclo de vida avaliado?

Ekvall, Tillman e Molander (2005) destacam a importância de declarar o ponto de vista aplicado ao estudo. Isso deve ser feito na fase de definição de objetivo e escopo. Essas informações possibilitam ao leitor do relatório avaliar se ele compartilha do ponto de vista normativo sobre o qual a metodologia de ICV foi baseada. Do mesmo modo, os revisores do estudo podem verificar se as escolhas metodológicas ao longo do estudo estão coerentes com o objetivo e o escopo.

2.4.2 Estudos prospectivos e retrospectivos

Conforme Curran, Mann e Norris (2005), os estudos consequenciais e atribucionais podem se referir ao passado, presente ou futuro. Os estudos que tratam de situações passadas são chamados de retrospectivos. Aqueles que tratam de situações que podem vir a ocorrer são denominados prospectivos. Dessa forma, um estudo pode responder às seguintes questões:

- a) atribucional prospectivo: como serão os fluxos (poluentes, recursos, trocas entre processos) no ciclo de vida de interesse?
- b) atribucional retrospectivo: como eram os fluxos no ciclo de vida de interesse?
- c) consequencial prospectivo: como decisões futuras mudarão os fluxos dentro e fora do ciclo de vida de interesse?
- d) consequencial retrospectivo: como decisões passadas mudaram os fluxos dentro e fora do ciclo de vida de interesse?

2.4.3 Dados de inventário em função da abordagem

Com relação a quais unidades de processo devem ser incluídas no estudo, já foi mencionado que na ACV atribucional o sistema investigado é limitado ao ciclo de vida do “berço ao túmulo”. As atividades pertinentes ao sistema não podem ser omitidas, exceto no caso de serem insignificantes (TILLMAN, 2000). O inventário é, portanto, uma exata descrição dos fluxos do sistema em determinado momento (CURRAN; MANN; NORRIS, 2005).

Diferentemente, quando o objetivo é descrever as consequências de mudanças, geralmente não é suficiente, talvez nem mesmo relevante, incluir todos os fluxos desde a extração dos recursos naturais até o descarte final. Uma mudança

dentro do ciclo de vida de um produto pode não afetar todas as unidades de processo desse ciclo de vida. Por outro lado, as conseqüências de uma ação podem se propagar para fora do ciclo de vida estudado, em cadeias de causa-efeito. A regra geral é que os dados de ICV conseqüencial devem incluir todos os processos afetados por uma mudança (EKVALL; WEIDEMA, 2004).

Os mesmos autores salientam que é necessário, dentro da abordagem conseqüencial, adotar metodologias para determinar quais processos sofrem efeitos da mudança e, a partir daí, coletar dados apenas para esses processos. Nesse contexto, as relações causais econômicas são tão importantes quanto os fluxos físicos. Os efeitos de um aumento na demanda de determinado produto dependem, por exemplo, da reação da oferta, tendo em vista que nem sempre os fornecedores respondem a toda uma demanda. Sendo assim, a integração de ferramentas das ciências econômicas ao ICV resultaria em novas ferramentas com vantagens específicas para esse tipo de estudo. Deve-se ter em mente, entretanto, que as incertezas na análise econômica freqüentemente são significativas. Considerações acerca de conceitos e ferramentas econômicas úteis para ACV conseqüencial são apresentadas no APÊNDICE C.

Os dados de inventário na abordagem conseqüencial também dependem do horizonte temporal adotado pelo estudo. As conseqüências à mudança na demanda do produto, incremento ou redução, podem ser diferentes no curto prazo e no longo prazo, e, em razão disso, os dados de inventário também podem diferir (CURRAN; MANN; NORRIS, 2005; EKVALL; TILLMAN; MOLANDER, 2005). Para esses autores, a resposta no curto prazo ocorre na forma de mudanças dentro da capacidade existente de produção. Em outras palavras, no curto-prazo a capacidade de produção é considerada fixa, somente a utilização da capacidade varia. No longo-prazo, a resposta ocorre na forma de mudanças nos investimentos em nova capacidade produtiva.

Outra questão debatida acerca de dados de inventário em ACV, e que está associada à abordagem escolhida, é a utilização de dados médios ou marginais (WEIDEMA; FREES; NIELSEN, 1999; TILLMAN, 2000; EKVALL; TILLMAN; MOLANDER, 2005). De acordo com os trabalhos citados, dados médios de um sistema são aqueles que representam a carga ambiental média para produção de uma unidade de determinado produto, resultado da combinação de um grande número de dados de diferentes tecnologias e condições. Desse modo, os dados

médios não necessariamente representam o caso real do produto em avaliação. Tomando como exemplo um determinado processo produtivo consumidor de eletricidade, os dados médios acerca da eletricidade consumida pelo processo considerariam a média entre diversas tecnologias geradoras de energia elétrica na região. Por outro lado, os dados marginais representam os impactos reais causados por uma pequena mudança na produção. Desse modo, os dados marginais, no caso do exemplo do consumo de eletricidade, seriam os dados das tecnologias específicas de geração de eletricidade afetadas pela mudança na produção do processo em questão. Em outras palavras, os dados marginais sempre estão relacionados a uma tecnologia bem definida, específica, que é a tecnologia afetada pela mudança, também chamada de tecnologia marginal.

É importante esclarecer que o termo “marginal” também está associado à magnitude da mudança. A modelagem pode ser denominada marginal para o caso de pequenas mudanças, suficientemente pequenas para serem consideradas infinitesimais e, portanto, lineares. No caso de mudanças grandes a modelagem é denominada incremental (AZAPAGIC; CLIFT, 1999; CURRAN; MANN; NORRIS, 2005; WEIDEMA; EKVALL, 2009).

Como regra geral, recomenda-se utilizar dados médios para estudos atribucionais e dados marginais para estudos consequenciais (FRISCHKNECHT¹³, 1997, *apud* TILLMAN, 2000; EKVALL; TILLMAN; MOLANDER, 2005).

2.4.4 Relação entre procedimento de alocação e a abordagem

Um problema metodológico em inventários de ciclo de vida é a alocação da carga ambiental em sistemas que fornecem mais de uma função. Quando apenas uma das funções for de interesse do estudo, deve-se adotar um procedimento para encontrar a carga ambiental correspondente à função de interesse. De acordo com Ekvall e Tillman (1997), um procedimento de alocação pode efetivamente alocar as cargas ambientais ou evitar a alocação por meio de técnicas adequadas.

São exemplos de processos multifuncionais tanto processos de produção com saída de mais de um produto, como um processo de tratamento de resíduos

¹³ FRISCHKNECHT, R. Goal and scope definition and inventory analysis in LCANET, European network for strategic life cycle assessment research and development. In: HAES, H. U.; WRISBERG, H. (Eds). **LCA documents**. v. 1. Bayreuth, Germany: Eco-Infoma Press, 1997.

que recebe mais de um tipo de resíduo. No segundo caso o estudo busca determinar a responsabilidade ambiental de cada resíduo tratado (EKVALL; FINNVEDEN, 2001). A Figura 3 ilustra um processo multifuncional teórico simples, com dois produtos, onde somente um deles é de interesse do estudo.

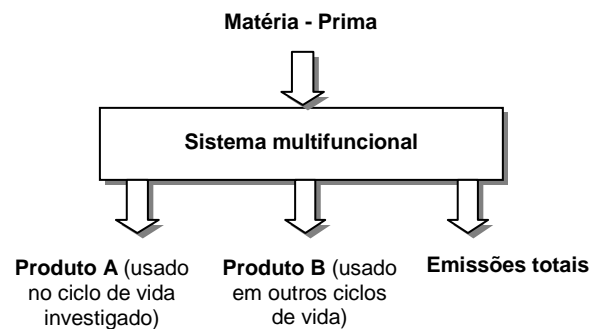


Figura 3 – Sistema de produto com mais de uma função

Fonte: Adaptado de Ekvall e Weidema (2004)

O processo mostrado na Figura 3 fornece duas saídas funcionais, sendo que o consumo de recursos e as emissões são comuns. Em um estudo de ACV ou ICV do produto A, há a necessidade de distribuir a responsabilidade pelas emissões e uso de recursos entre os produtos A e B.

2.4.4.1. Procedimentos de alocação conforme as normas ISO

Conforme ABNT (2006b) há uma hierarquia de procedimentos para tratar o problema de alocação em sistemas multifuncionais. A norma, entretanto, não faz qualquer comentário acerca das consequências decorrentes da aplicação dos diferentes métodos, nem discute a viabilidade e as dificuldades de cada um deles (EKVALL; FINNVEDEN, 2001). A hierarquia mencionada na norma é a seguinte:

- a) a alocação deve ser evitada, sempre que possível, por meio de:
 - desagregação do sistema em sub-processos e coleta dos dados de entrada e saída relacionados a esses subprocessos;
 - expansão do sistema de produto de modo a incluir as funções adicionais relacionadas aos co-produtos¹⁴.

¹⁴ Um co-produto é qualquer um dentre dois ou mais produtos procedentes do mesmo processo elementar ou sistema de produto (ABNT, 2006a, 2006b).

- b) quando a alocação não puder ser evitada, as entradas e saídas devem ser distribuídas entre as funções do sistema de maneira a refletir relações físicas. Em outras palavras, convém determinar a maneira pela qual as entradas e saídas são alteradas em decorrência de mudanças quantitativas nos produtos ou funções fornecidos pelo sistema;
- c) quando uma relação física não puder ser usada como base para a alocação, adotar outras relações entre os co-produtos, como a alocação proporcional ao valor econômico de cada um deles.

O primeiro passo, portanto, de acordo com as normas ISO, para resolver o problema de multifuncionalidade é tentar evitar a alocação. O meio mais simples para atingir esse objetivo é subdividir o sistema em vários sub-processos, cada um deles contribuindo para apenas uma saída funcional, como mostra a Figura 4.

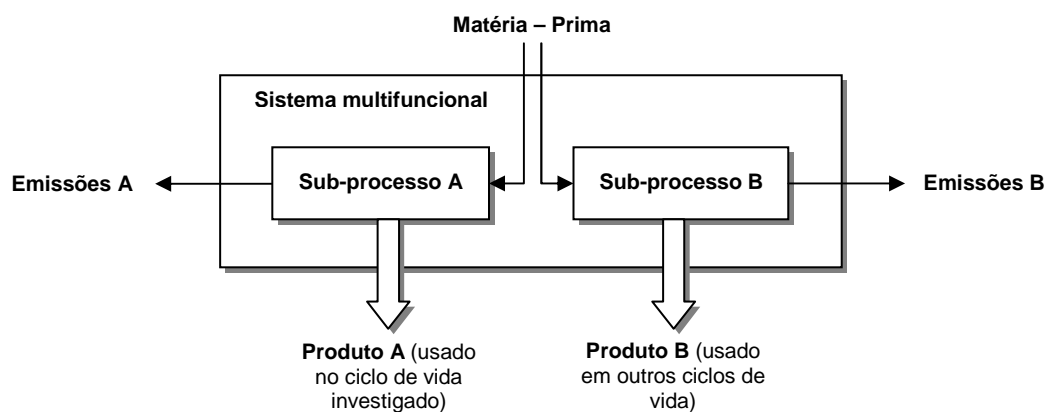


Figura 4 – Subdivisão de um sistema multifuncional

Fonte: Adaptado de Ekvall e Weidema (2004)

A abordagem da subdivisão do sistema, entretanto, raramente evita a necessidade de alocação porque a maioria dos sistemas multifuncionais inclui processos que são comuns para algumas ou todas as suas saídas funcionais, de modo que a alocação ainda será necessária (AZAPAGIC; CLIFT, 1999; EKVALL; FINNVEDEN, 2001). Por outro lado, uma vantagem da subdivisão do sistema, quando for possível aplicá-la, é que resulta num melhor detalhamento do processo (EKVALL; FINNVEDEN, 2001).

Não sendo possível a desagregação em sub-processos, o passo seguinte é buscar a expansão do sistema. Para ilustrar esse procedimento a Figura 5 apresenta

dois sistemas em que o objetivo hipotético do estudo é comparar o produto A com o produto C.

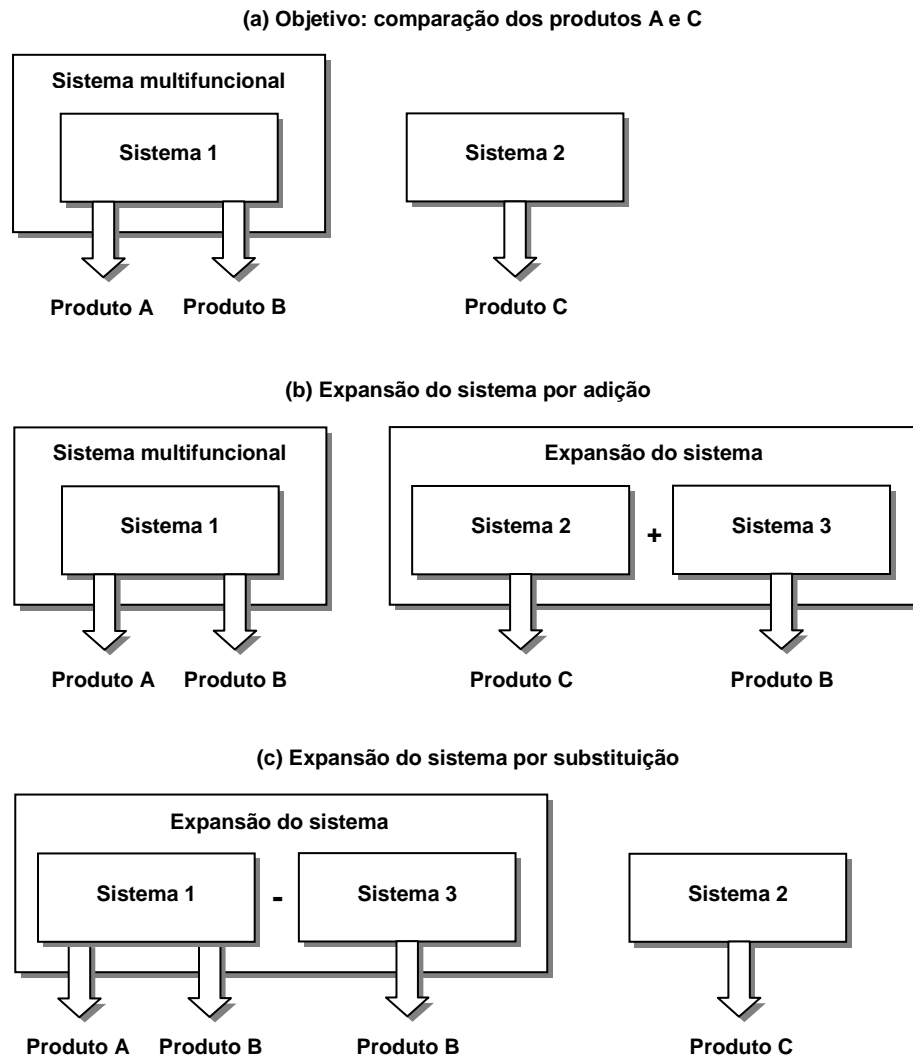


Figura 5 – Expansão do sistema para eliminar a alocação

Fonte: Adaptado de Azapagic e Clift (1999)

De acordo com Azapagic e Clift (1999) e Heijungs e Guinée (2007), a alocação pode ser evitada usando duas formas diferentes de expansão do sistema. Eles não fornecem os mesmos resultados, mas levam às mesmas conclusões. No primeiro caso, o sistema pode ser expandido adicionando-se uma maneira alternativa de produzir B ao sistema 2 (Figura 5b). A comparação é agora entre o sistema 1 (produz A+B) e os sistemas 2 e 3 (produzem C+B). Evidentemente, eventuais diferenças nessa comparação só podem corresponder às diferenças entre os produtos A e C. A outra possibilidade é subtrair do sistema 1 as cargas

ambientais provocadas pelo produto B (Figura 5c). Para isso, da mesma forma que no primeiro caso, deve-se encontrar uma maneira alternativa de produzir B, de modo que apenas A é comparado com C. Conforme Heijungs e Guinée (2007), a idéia implícita nesse segundo método é que um co-produto substitui a fabricação de um produto equivalente no mercado. Os mesmos autores citam como exemplo a incineração de resíduos com co-produção, simultânea, de eletricidade; o co-produto eletricidade evita a produção que ocorreria a partir de outra fonte, como por exemplo, uma usina termelétrica ou nuclear. Por isso, a carga ambiental da produção de eletricidade evitada deve ser descontada do sistema de incineração. Weidema (2003) considera mais adequada a segunda possibilidade (Figura 5c) porque representa melhor o que acontece na realidade.

Há certa confusão acerca da nomenclatura desses dois métodos para expansão do sistema. A própria norma ISO não faz uma diferenciação. Ela menciona apenas a expansão do sistema como uma maneira de evitar a alocação (HEIJUNGS; GUINÉE, 2007). Em vários estudos a expressão “ampliação do sistema” é usada para o caso (b) na Figura 5, onde há adição. O caso (c), em que há subtração, é freqüentemente denominado “método da substituição”, “método das cargas evitadas” ou, ainda, “redução do sistema” (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Diante das considerações acerca do procedimento de expansão do sistema, pode-se concluir que é mais conveniente utilizar o procedimento ilustrado na Figura 5c porque, como já mencionado, traduz melhor o que ocorre na prática. Com relação à denominação, parece que oferece maior clareza a utilização das expressões: expansão do sistema por adição e expansão do sistema por substituição, tendo em vista que ambos os procedimentos não deixam de ser expansões do sistema; o que os diferencia é que um deles adiciona e o outro subtrai.

Há algumas dificuldades para aplicação dos métodos de expansão do sistema. Uma delas é que o estudo se torna mais complicado em razão do maior volume de dados. Além disso, ambos dependem da existência de um produto alternativo com função equivalente para ser adicionado ou subtraído do sistema (AZAPAGIC; CLIFT, 1999; HEIJUNGS; GUINÉE, 2007). Havendo um possível produto equivalente, com freqüência há incertezas para determinar a exata equivalência em termos de função entre produto substituído e substituto, o que é fundamental para a precisão do resultado. Outro problema para aplicação desses

métodos ocorre quando o processo alternativo também é multifuncional, exigindo, portanto, a inclusão de mais um processo no sistema, numa cadeia que pode ser infinita (HEIJUNGS; GUINÉE, 2007). Por outro lado, uma vantagem dos métodos é que permitem incluir atividades afetadas fora do sistema investigado, contribuindo para melhor compreensão das conseqüências ambientais de produtos (TILLMAN¹⁵ *et al.*, 1994, *apud* EKVALL; FINNVEDEN, 2001). Ainda que a expansão do sistema não seja viável, o estudo obriga-se a admitir que o resultado reflete apenas parcialmente a realidade, oferecendo, com isso, a transparência esperada em estudos de ACV (EKVALL; FINNVEDEN, 2001).

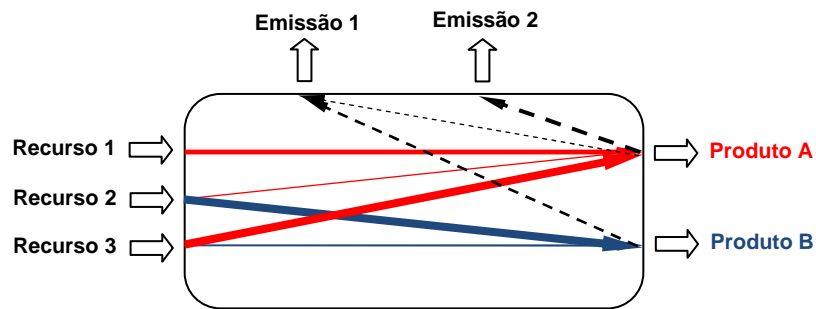
De acordo com ABNT (2006b), caso não seja possível evitar a alocação pela decomposição do processo multifuncional, nem pela expansão do sistema, a alocação poderá se basear em relações físicas¹⁶ entre as cargas ambientais e as funções, ou produtos, do sistema.

A causalidade física usada como base para a alocação deve ser determinada pela modelagem matemática do real comportamento do sistema de produto. Há trabalhos que descrevem o uso de programação linear com essa finalidade (AZAPAGIC; CLIFT, 1998; AZAPAGIC; CLIFT, 1999). O modelo deve descrever a maneira na qual as cargas ambientais são quantitativamente alteradas em função de mudanças quantitativas nas funções fornecidas pelo processo ou sistema (AZAPAGIC; CLIFT, 1999; EKVALL; FINNVEDEN, 2001; EUROPEAN COMMISSION, 2010). Portanto, a alocação por meio de relações físicas entre as cargas ambientais e os co-produtos não significa adotar arbitrariamente uma proporção simples entre as funções, tal como massa ou conteúdo energético, embora isso seja feito em diversos estudos.

A Figura 6 apresenta um processo multifuncional hipotético em que as diversas cargas ambientais reais estão associadas a cada um dos co-produtos.

¹⁵ Tillman, A. M. Choice of system boundaries in life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 2, n. 1, p. 21–29, 1994.

¹⁶ O termo “relações físicas” tem um significado amplo nesse contexto e inclui relações físicas, químicas e biológicas (AZAPAGIC; CLIFT, 1999; EUROPEAN COMMISSION, 2010).



Obs.: a espessura das linhas simboliza a quantidade relativa dos fluxos do processo

Figura 6 – Alocação por relações causais físicas em processos multifuncionais
Fonte: Adaptado de European Commission (2010)

No processo mostrado pela Figura 6, uma regra arbitrária e uniforme causaria erro de alocação; por exemplo, dividiria os recursos 1 e 2 na mesma proporção entre os co-produtos A e B. O recurso 1, porém, é uma carga ambiental associada somente ao produto A e, portanto, deveria ser totalmente alocado a esse co-produto. O mesmo raciocínio vale para as emissões.

Com isso, diferente do que é comum na prática, não há necessidade de aplicar o mesmo critério de causalidade física para todos os fluxos não-funcionais. Na realidade, essa uniformidade raramente está correta, podendo existir uma causalidade específica para cada fluxo dentro do processo multifuncional (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Existem casos, entretanto, onde relações físicas não podem ser usadas como método de alocação. A alocação somente pode ser baseada no princípio da causalidade física nas situações em que é possível variar uma saída funcional enquanto as outras são mantidas constantes (AZAPAGIC; CLIFT, 1999; EKVALL; FINNVEDEN, 2001). Na produção agrícola da soja, por exemplo, não é possível alterar a produção de farelo de soja mantendo constante a produção de óleo; ao variar a produção de farelo, simultaneamente a do óleo varia e vice-versa.

Quando nenhuma das soluções anteriores puder ser adotada para evitar ou realizar a alocação, a última alternativa recomendada pela ABNT (2006b) é utilizar outras relações entre os co-produtos - por exemplo, o valor econômico.

2.4.4.2. Crítica à alocação recomendada pelas normas ISO

A questão da alocação em processos multifuncionais está diretamente associada à escolha da abordagem em ACV. Dito de outra maneira, o critério de alocação deve ser consistente com o objetivo do estudo e, em consequência, com a abordagem adotada: atribucional ou consequencial (SETAC¹⁷, 1993, *apud* EKVALL; TILLMAN, 1997; CURRAN; MANN; NORRIS, 2005). Essa interpretação não está de acordo com as normas ISO para ACV, as quais estabelecem uma ordem de prioridade, independentemente do objetivo do estudo.

Visando fornecer fundamentos para a escolha do procedimento de alocação, Ekvall e Tillman (1997) e Tillman (2000) mostram que para que o procedimento de alocação seja consistente com o objetivo do estudo de ciclo de vida, deve ser baseado, se possível, em relações de causalidade. Conforme os mesmos autores há, pelo menos, duas categorias de relações causais, como ilustrado pela Figura 7: as causalidades orientadas para a causa descrevem as relações entre o sistema investigado e suas causas, já as causalidades orientadas para o efeito são as relações entre o sistema investigado e suas consequências.

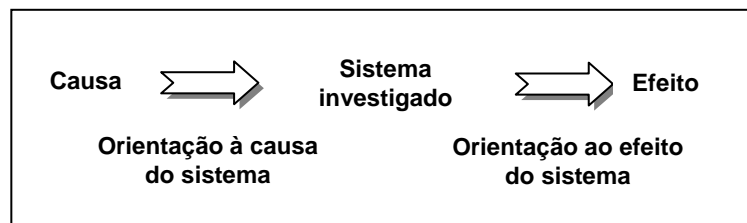


Figura 7 – Relações de causalidade como base para alocação

Fonte: Ekvall e Tillman (1997), Tillman (2000)

Para exemplificar, Huppés¹⁸ (1994, *apud* Ekvall e Tillman, 1997) defende que a alocação deveria considerar o valor bruto de vendas, visto que o fator econômico é o principal motivador da produção. O fabricante produz em razão da disposição do consumidor em pagar pelo produto. Esse é um exemplo de alocação

¹⁷ SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC). **Guidelines for life cycle assessment**: code of practice. In: SETAC WORKSHOP, 1993, Sesimbra, Portugal.

¹⁸ HUPPES, G. A general method for allocation in LCA. In: EUROPEAN WORKSHOP ON ALLOCATION IN LCA, 1994, Leiden. **Proceedings**.

orientada à causa. Tillman¹⁹ *et al.* (1994, *apud* Ekvall e Tillman, 1997) fornecem outro exemplo de causalidade: quando um sistema de produto é fornecedor, por exemplo, de material reciclado, pode haver redução na demanda por material virgem em outros sistemas. Os efeitos do produto de interesse sobre outros ciclos de vida podem ser considerados por meio da expansão do sistema, que é um procedimento de alocação baseado na causalidade orientada ao efeito.

Desse modo, chega-se à conclusão de que existe uma conexão entre as abordagens, atribucional e conseqüencial, e os métodos de alocação. Como a ACV conseqüencial visa avaliar as conseqüências de mudanças, sua orientação é ao efeito. Nesse caso, a expansão do sistema é o procedimento mais adequado, tendo em vista que a expansão do sistema inclui processos afetados, dentro e fora do ciclo de vida onde a mudança ocorre (TILLMAN, 2000; EKVALL; WEIDEMA, 2004). A alocação por relações físicas causais também é um método adequado para ACV conseqüencial, uma vez que ao variar uma das saídas, mantendo-se as demais fixas, é possível identificar os efeitos dessa mudança sobre as cargas ambientais do sistema (WEIDEMA, 2003).

Por outro lado, na ACV atribucional, cujo objetivo é descrever o sistema de interesse desde a extração da matéria-prima até a destinação final do produto, os problemas de alocação são geralmente resolvidos com orientação à causa do sistema. Isso é feito por meio da divisão da carga ambiental proporcionalmente a alguma propriedade que represente o motivo da produção de cada um dos co-produtos do sistema, como o valor econômico (EKVALL; TILLMAN; MOLANDER, 2005). Para Weidema (2003), a alocação por meio do valor econômico é a única opção para alocação em estudos atribucionais, pois o interesse econômico é a única motivação para a produção. Conforme Azapagic e Clift (1999), embora não seja o procedimento adequado, as relações econômicas ainda representam algum tipo de causalidade: as demandas socioeconômicas causadoras da existência dos sistemas multifuncionais. Para European Commission (2010), uma desvantagem do uso do valor econômico para alocação é a incorreta suposição de correlação positiva entre preço e impacto ambiental. Essa suposição desconsidera, por exemplo, que investimentos em tecnologia para redução de emissões podem aumentar os custos dos produtos, mas reduzem impactos ambientais.

¹⁹ TILLMAN, A. M. *et al.* Choice of system boundaries in life cycle assessment. **Journal of Cleaner**

Além do valor econômico, na prática a alocação também tem sido feita em proporção a alguma propriedade física dos co-produtos, como massa, volume ou conteúdo energético. Adotar a proporção em massa, volume ou conteúdo energético é o método predominante em inventários em razão da facilidade de obtenção e interpretação de dados (EKVALL; FINNVEDEN, 2001). Nesse caso, contudo, a alocação é completamente arbitrária, visto que não se baseia em quaisquer modelos de relações causais (AZAPAGIC; CLIFT, 1999; EKVALL; FINNVEDEN, 2001; HEIJUNGS; GUINÉE, 2007). Pode ser utilizada, entretanto, em processos multifuncionais pouco significativos em relação à carga ambiental total do sistema estudado, onde não valeria a pena despende tempo em uma análise mais detalhada (EKVALL; FINNVEDEN, 2001).

Em última análise, é importante ressaltar que os diversos autores citados nessa seção discordam da forma como a alocação é tratada nas normas ISO. As normas apresentam os procedimentos de alocação hierarquicamente, numa ordem de preferência, que é a seguinte: subdivisão do sistema, expansão do sistema, relações físicas causais, relações entre os co-produtos (como, por exemplo, o valor econômico). Para Tillman (2000), caso a subdivisão do sistema não seja possível, a hierarquia de procedimentos descritos nas normas ISO acaba, indiretamente, estabelecendo a abordagem consequencial como prioritária, visto que a expansão do sistema aparece como a alternativa seguinte. Isso, conforme o entendimento da autora, não está correto, já que a escolha depende do objetivo do estudo, não podendo haver prioridade prévia em favor de uma ou outra abordagem.

2.4.5 Aplicações

Cada uma das perspectivas para estudos de ACV possui aplicações específicas. No caso da abordagem atribucional, algumas das aplicações são as seguintes (WEIDEMA; FREES; NIELSEN, 1999; TILLMAN, 2000; WEIDEMA; EKVALL, 2009):

- a) identificação de pontos de melhoria do desempenho ambiental do produto dentro do seu sistema berço-túmulo;

- b) declarações ambientais de produtos, também denominado de rotulagem ambiental;
- c) identificação de responsabilidades pela carga ambiental dentro de um sistema de produto com objetivo de estabelecer políticas tributárias diferenciadas sobre estas atividades. Neste caso, o objetivo não é estudar as conseqüências dos tributos;
- d) identificar e evitar a responsabilização por atividades ilegais no sistema de produto;
- e) premiar ações ambientalmente boas, como o investimento em uma tecnologia menos poluente.

Exemplos de aplicações em que normalmente a ACV conseqüencial fornece informações relevantes são (WEIDEMA; FREES; NIELSEN, 1999; TILLMAN, 2000; WEIDEMA; EKVALL, 2009; REINHARD; ZAH, 2009):

- a) desenvolvimento de produtos;
- b) elaboração de políticas públicas;
- c) avaliação de alternativas para melhoria do produto;
- d) aumento na demanda do produto.

Como as duas abordagens resultam em tipos diferentes de informação, vale ressaltar que existe a possibilidade de que, em algumas ocasiões, seja útil realizar ambos os tipos de estudo para que se obtenham informações complementares (TILLMAN, 2000).

2.4.6 Vantagens e limitações

O Quadro 3 resume as principais vantagens e desvantagens da ACV atribucional e da ACV conseqüencial.

Tópico	Atribucional	Conseqüencial
Ética normativa	Preocupa-se em não estar associado a sistemas de alto impacto: quanto menos impacto, melhor. Uma desvantagem é que possui “pontos cegos” em razão de não levar em consideração as conseqüências de ações.	Preocupa-se com as conseqüências de ações, evitando “pontos cegos”. Porém, somente rejeita ações que ultrapassam determinado limiar considerado prejudicial: nem sempre menos carga ambiental é melhor.

continua

conclusão

Tópico	Atribucional	Conseqüencial
Clareza do objetivo	A princípio, o objetivo não é tão bem definido como na abordagem conseqüencial.	Mais claro e direto: avaliar conseqüências de ações.
Identificação dos processos do sistema	É simples, pois se limita ao ciclo de vida de interesse. Os processos são interligados por fluxos físicos.	Pode haver dificuldade para identificação das tecnologias marginais, pois isso envolve relações econômicas.
Coleta de dados	Os dados devem ser coletados apenas no sistema de interesse. Porém, todos os fluxos do sistema devem ser incluídos, exceto sejam insignificantes.	Necessidade de coletar dados apenas para as partes afetadas no sistema de interesse, mas deve considerar efeitos indiretos.
Alocação	Em processos multifuncionais, aloca cargas ambientais. Isso pode gerar incertezas, pois o procedimento não está fundamentado nas ciências naturais.	Geralmente adota a expansão do sistema para evitar a alocação. Desse modo, a incerteza inerente à alocação é eliminada.
Aceitabilidade	A metodologia está bem estabelecida.	Carece de procedimentos detalhados.
Recursos de modelagem	Normalmente utiliza recursos de modelagem baseados nas ciências naturais (fluxos entre processos), exceto no caso da alocação.	Há necessidade de modelos econômicos, além da modelagem baseada nas ciências naturais.
Completeza	Teoricamente é possível produzir estudos bastante completos, exceto quando há confidencialidade de dados de inventário.	É impossível avaliar a totalidade das conseqüências de ações. As cadeias de causa e efeito podem ser infinitas. Deve-se avaliar a significância para delimitação do estudo.
Aprendizado	Proporciona informações completas acerca do ciclo de vida de interesse, permitindo conhecê-lo bem.	Não fornece informações completas acerca do ciclo de vida de interesse, mas apresenta uma visão mais abrangente das conseqüências de decisões.
Custo do estudo	Impossível determinar um padrão. Varia bastante, em função do detalhamento e qualidade dos dados exigidos pelo objetivo do estudo.	Impossível determinar um padrão. A modelagem econômica necessita de dados que podem não estar prontamente disponíveis.
Exatidão e precisão	Teoricamente menos exato, porém mais preciso.	Teoricamente mais exato, porém menos preciso.
Facilidade de compreensão dos resultados	Tende a ser mais complexo em número de unidades de processo, porém é conceitualmente mais simples. Em geral, o conceito “berço-túmulo” é bem compreendido.	Tende a ser conceitualmente mais complexo, porém com menor número de unidades de processo. Em geral, o conceito conseqüencial é bem compreendido.

Quadro 3 – Vantagens e limitações das abordagens atribucional e conseqüencial

Fonte: Adaptado de Weidema, Frees e Nielsen (1999), Tillman (2000), Ekvall e Weidema (2004), Ekvall, Tillman e Molander (2005), Rosell e Moisaner (2008), Dalgaard *et al.* (2008), Schmidt (2008)

A partir do Quadro 3 conclui-se que cada uma das perspectivas possui pontos positivos e negativos. Percebe-se, porém, que a abordagem atribucional está bem estabelecida em termos metodológicos. A abordagem conseqüencial ainda

carece de desenvolvimento e procedimentos detalhados. Apesar disso, apresenta uma boa proposta de avaliação ambiental de produtos e, por isso, tende a ser aprimorada ao longo do tempo.

2.4.7 As normas ISO e as duas abordagens

As normas ISO, mesmo após revisão, não tratam da diferenciação entre as abordagens de ACV. Os objetivos da revisão das normas foram: resumir, melhorar a clareza e corrigir inconsistências. O conteúdo técnico não foi alterado (FINKBEINER *et al.*, 2006). A ABNT (2006a) apenas menciona que têm sido desenvolvidas duas possíveis abordagens. De acordo com a norma, um dos métodos contabiliza e atribui os impactos ambientais potenciais a um sistema de produto específico e o outro método estuda as conseqüências ambientais de possíveis mudanças entre sistemas de produto alternativos. A norma não inclui informações acerca das implicações dos diferentes métodos sobre o estudo de ciclo de vida, como, por exemplo: a viabilidade dos métodos, a quantidade de trabalho necessária ou quais tipos de informações resultam da aplicação dos métodos.

Apesar da questão da alocação em processos multifuncionais ser bem coberto pela ISO 14044 (EUROPEAN COMMISSION, 2010), o detalhamento dos procedimentos de alocação não poderia estabelecer prioridades, tendo em vista que isso é incompatível com a existência das duas abordagens. Por isso, as recomendações acerca dos procedimentos de alocação devem ser reformuladas (TILLMAN, 2000). Com isso, em futuras revisões das normas ISO, a distinção entre ACV atribucional e ACV conseqüencial precisa ser tratada em detalhes.

3 MÉTODOS

O método adotado para esse trabalho é a avaliação consequencial prospectiva do ciclo de vida. Nesse capítulo a metodologia será detalhadamente apresentada.

A seção 3.1 trata da definição da unidade funcional em ACV consequencial. Na seção 3.2 são apresentados os procedimentos para encontrar os fornecedores/tecnologias afetados por mudanças. A seção 3.3 detalha como se deve lidar com co-produtos em ACV consequencial. Por último, a seção 3.4 traz algumas considerações específicas de ACV consequencial do uso agrícola do solo.

3.1 UNIDADE FUNCIONAL EM ACV CONSEQÜENCIAL

Para um tratamento sistemático da definição da unidade funcional e do fluxo de referência em estudos consequenciais, Weidema (2003), Weidema e Ekvall (2009) sugerem o procedimento ilustrado na Figura 8. Toda a descrição do procedimento é baseada nesses trabalhos; informações complementares, extraídas de outros trabalhos, são citadas ao longo da seção.

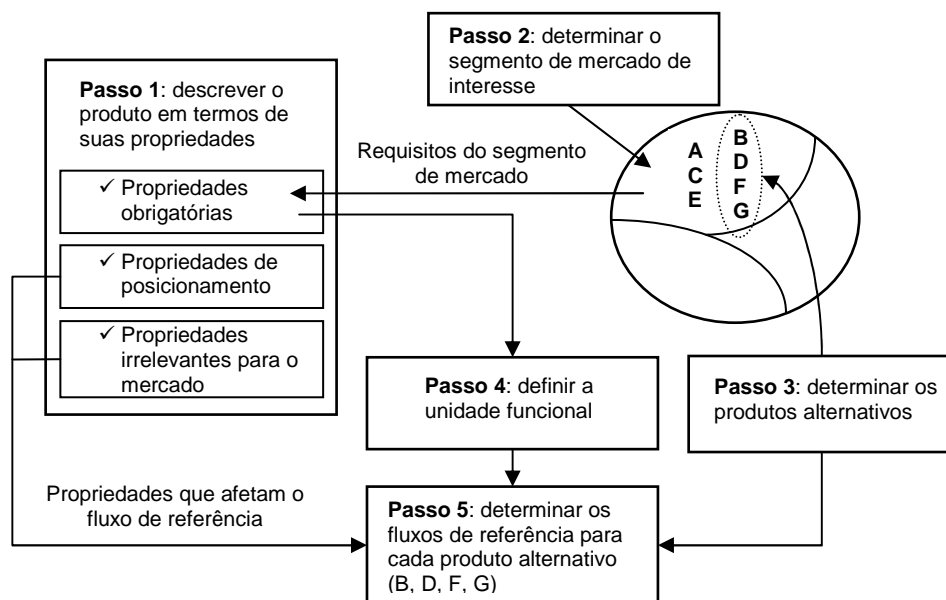


Figura 8 – Unidade funcional e fluxo de referência em ACV consequencial

Fonte: Weidema (2003)

De acordo com a Figura 8, o primeiro passo é descrever o produto de interesse em termos de suas propriedades, subdividindo-as em: obrigatórias, de posicionamento, e irrelevantes para o mercado. A identificação do segmento de mercado ou do nicho de mercado (passo 2) visa identificar produtos substitutos. No passo 3 são selecionados os produtos que farão parte do estudo, de acordo com os objetivos do mesmo. No passo 4, a unidade funcional é determinada com base nas propriedades obrigatórias do produto. Por último, calcula-se o fluxo de referência para cada produto alternativo selecionado anteriormente no passo 3.

Embora o procedimento seja descrito em cinco passos consecutivos, não é obrigatório que essa ordem seja obedecida. As propriedades do produto (passo 1) podem ser determinadas a partir de um segmento de mercado previamente selecionado (passo 2). As propriedades podem ser determinadas até mesmo a partir dos produtos alternativos previamente identificados (passo 3). Outra possibilidade é que a unidade funcional (passo 4), seja definida primeiro, com a identificação dos produtos alternativos sendo feita a partir da unidade funcional. Em suma, diferentes estudos podem apresentar diferentes seqüências de passos.

A seguir são apresentados conceitos importantes acerca de cada uma das etapas do procedimento para identificação da unidade funcional e do fluxo de referência em estudos consequenciais.

3.1.1 Descrição do produto em termos de propriedades

Com a finalidade de realizar comparações entre o desempenho ambiental de produtos, um dos passos é listar as propriedades. Propriedades de produtos podem ser divididas em três categorias: obrigatórias, de posicionamento e propriedades irrelevantes para o mercado.

De acordo com European Commission (2010), propriedades obrigatórias são características que o produto deve possuir para que o usuário perceba-o como funcionalmente útil. Para Pommer *et al.* (2003), as propriedades obrigatórias derivam de requisitos bem estabelecidos - por exemplo, controle remoto para televisores - e também de exigências legais - como cintos de segurança em automóveis.

As propriedades de posicionamento, por outro lado, são características opcionais, as quais podem dar ao produto uma posição favorável em relação a outros produtos com as mesmas propriedades obrigatórias. Para European

Commission (2010), são exemplos de propriedades de posicionamento: conforto, imagem e aspectos estéticos.

Além das propriedades obrigatórias e de posicionamento, os produtos podem ter outras propriedades. Essas propriedades não desempenham nenhum papel do ponto de vista do mercado em estudo. Dito de outra maneira, essas propriedades não desempenham nenhum papel nas preferências do consumidor. Por exemplo, diferentes tipos de embalagens recarregáveis para determinado produto, ao retornarem à fábrica, podem diferir em termos de facilidade de limpeza antes do reuso. Essa propriedade, irrelevante para o mercado consumidor desse produto, pode originar diferentes conseqüências, como o tipo e a quantidade do agente de limpeza utilizado. Por isso, as propriedades irrelevantes para o mercado devem ser relacionadas, tendo em vista que podem afetar o desempenho ambiental do produto e devem ser analisadas na seqüência do estudo.

As propriedades de produtos podem estar relacionadas à:

- a) funcionalidade: relacionada com a função principal do produto;
- b) qualidade técnica: estabilidade, durabilidade, facilidade de manutenção, etc.;
- c) serviços adicionais prestados durante o uso e o descarte;
- d) estética: aparência;
- e) imagem: seja do produto, seja do fabricante;
- f) preço: relativos à compra, uso e disposição final;
- g) características ambientais específicas.

Dentre as propriedades mencionadas acima, o preço é a única que pode ser bem definida. Qualidade técnica e funcionalidade podem ser descritas de uma maneira um pouco menos precisa, mas isso ainda pode ser feito quantitativamente. As demais propriedades podem ser descritas apenas qualitativamente.

Deve-se destacar que as propriedades ambientais também podem estar presentes. Entretanto, como o propósito da ACV é estudar impactos ambientais de produtos, não é coerente afirmar, com antecedência, que o produto a ser analisado deve possuir propriedades gerais, tais como: ser “ambientalmente amigável” ou “não-tóxico”. É exatamente isso que se pretende avaliar com a realização do estudo. Sendo assim, propriedades ambientais listadas nessa fase devem ser específicas, de modo que seja fácil identificar, antes do estudo, os produtos que as possuem. Por exemplo, o objetivo do estudo pode ser comparar diversas opções de transporte

público que não emitem gases de efeito estufa durante a fase de uso dos veículos. Essa propriedade é facilmente verificável, de modo que apenas as opções que cumprem esse requisito serão selecionadas para o estudo. Por outro lado, comparar veículos “ambientalmente amigáveis” não seria uma propriedade identificável nessa fase; apenas ao final do estudo seria possível esse tipo de avaliação.

3.1.2 Determinar o segmento de mercado e os produtos alternativos

Um segmento de mercado consiste em um grupo de compradores identificados a partir de suas preferências, poder de compra, localização geográfica, e atitudes e hábitos de compra similares. Supõe-se que os membros de determinado segmento tenham preferências e necessidades muito similares. Por exemplo, uma empresa automobilística pode identificar quatro segmentos gerais de consumidores: aqueles que simplesmente desejam um meio de transporte, os que buscam alto desempenho, compradores que buscam luxo ou aqueles que priorizam a segurança (KOTLER, 2000). Desse modo, para que produtos pertençam ao mesmo segmento, devem ser considerados substituíveis pelos clientes desse segmento; em outras palavras, devem possuir as mesmas propriedades obrigatórias.

Além dos segmentos, é possível a identificação de nichos de mercado. De acordo com Kotler (2000), os profissionais de marketing identificam nichos subdividindo um segmento ou definindo um grupo que procura por um distinto *mix* de benefícios. Os segmentos são grandes e atraem vários concorrentes; já os nichos apresentam poucos concorrentes. Conforme European Commission (2010), ainda que alguns consumidores de determinado nicho considerem substituíveis apenas os produtos com as características específicas do nicho, na maioria das vezes os produtos de nicho são substituíveis por produtos do segmento de mercado a que pertencem. Já a substituição entre produtos de diferentes segmentos é muito pouco provável e pode ser considerada insignificante. Portanto, estudos de avaliação do ciclo de vida devem considerar cada um dos segmentos de mercado separadamente, não sendo coerente a comparação entre produtos de diferentes segmentos.

Além de determinar a segmentação do mercado em termos de requisitos do cliente, como descrito acima, também é importante estabelecer a segmentação geográfica. A localização geográfica do mercado pode ser classificada em: local,

regional ou global. Para exemplificar, consideremos o caso do alumínio. O alumínio é uma *commodity*²⁰ e, portanto, uma mudança na demanda afeta o mercado global de alumínio. Em contraste, a eletricidade necessária para atender a esse aumento de demanda afeta apenas um mercado regional, pois os sistemas elétricos são normalmente regionalizados, sem uma interligação global.

A relação entre preço e peso é um indicativo da segmentação geográfica do produto. No caso de uma baixa razão entre preço e peso, o mercado pode ser considerado local; para uma relação média, o mercado pode ser considerado continental; quando a relação for alta, o mercado é global. Quando houver dados disponíveis, devem ser considerados: barreiras tarifárias, padrões de comércio, produtos fabricados exclusivamente em determinadas localidades, entre outros. Em síntese, segmentos geográficos podem ser identificados por meio das trocas comerciais através das fronteiras geográficas.

Em geral, existe uma tendência de que os mercados tornem-se geograficamente mais homogêneos ao longo do tempo, mas, ao mesmo tempo, mais segmentados em relação às propriedades dos produtos. Como regra, se não houver informação disponível para justificar uma fronteira geográfica de mercado, é aconselhável assumir que não há fronteira, pois essa é a situação mais comum.

3.1.3 Definir a unidade funcional

A ACV busca, principalmente, comparar o desempenho ambiental de produtos que apresentam funções equivalentes. Até mesmo a avaliação de mudanças num mesmo produto envolve a comparação do produto existente com o produto modificado. Para um produto ser considerado um potencial substituto, deve satisfazer as mesmas necessidades. Pommer *et al.* (2003) afirmam que é inútil comparar o desempenho ambiental de dois produtos se eles não oferecem o mesmo serviço ao usuário.

A definição da unidade funcional é uma das etapas de um estudo de ACV e é tratada em detalhes no APÊNDICE B. De uma maneira resumida, a unidade

²⁰ Nas relações comerciais internacionais, o termo *commodity* refere-se à mercadoria em estado bruto, produto primário, de grande importância na economia mundial, como algodão, soja e minério de ferro (SANDRONI, 2005).

funcional quantifica a função que se quer estudar, levando em consideração as propriedades obrigatórias do produto.

Num estudo conseqüencial, a escala da unidade funcional não pode ser arbitrária. O tamanho da unidade funcional deve corresponder ao tamanho da mudança estudada para que os resultados do estudo representem as reais conseqüências da mudança.

3.1.4 Fluxos de referência de cada alternativa

O quinto passo no procedimento é a determinação do fluxo de referência para cada um dos produtos alternativos. O fluxo de referência é a quantificação dos produtos necessários para realizar a função, na escala definida pela unidade funcional. Para uma conceituação básica acerca de fluxo de referência, pode ser consultado o APENDICE B.

É importante ressaltar que, diferente da unidade funcional, não são apenas as propriedades obrigatórias que são importantes para a determinação do fluxo de referência. É necessário analisar todas as propriedades, com o objetivo de listar todos os produtos, e suas respectivas quantidades, necessários para atender a unidade funcional especificada.

Quando propriedades de posicionamento satisfazem funções adicionais, a comparação entre as funções de interesse deve ser realizada tratando as funções adicionais como co-produtos. Para cada propriedade que fornece uma função adicional, deve ser feita a expansão do sistema. Com isso, evita-se que essas diferenças funcionais invalidem a comparação com produtos que não contam com essas funções extras. Esse procedimento é idêntico ao utilizado para lidar com co-produtos, que também resulta na expansão das fronteiras do sistema. É aconselhável que no relatório final seja feita uma descrição das expansões do sistema que foram realizadas, distinguindo aquelas decorrentes de funções adicionais daquelas decorrentes de co-produtos.

Na definição do fluxo de referência, também é necessário incluir os produtos complementares que são usados em conjunto com o produto principal. Um produto complementar típico é a embalagem. Caso seja possível prever, também é necessário incluir produtos auxiliares utilizados durante o ciclo de vida, como aqueles destinados à manutenção, ao tratamento de resíduos, etc.

Um exemplo ilustra melhor uma propriedade irrelevante para o mercado e um produto complementar interferindo na determinação do fluxo de referência: na comparação de diferentes tecnologias de iluminação, os bocais e outras fixações (produtos complementares) devem ser incluídos, já que acompanham obrigatoriamente o produto principal e podem interferir no resultado do estudo. Ademais, o calor fornecido pela iluminação (propriedade irrelevante para esse mercado), fornece a função adicional de aquecimento em ambientes fechados. Conseqüentemente, a redução na necessidade de aquecimento ou o aumento na necessidade de resfriamento, causados pela iluminação, devem ser incluídos na comparação entre os diferentes produtos que realizam a função de iluminação. Essa função adicional, que é uma propriedade irrelevante para o mercado de iluminação, pode interferir no desempenho ambiental de cada uma das alternativas estudadas.

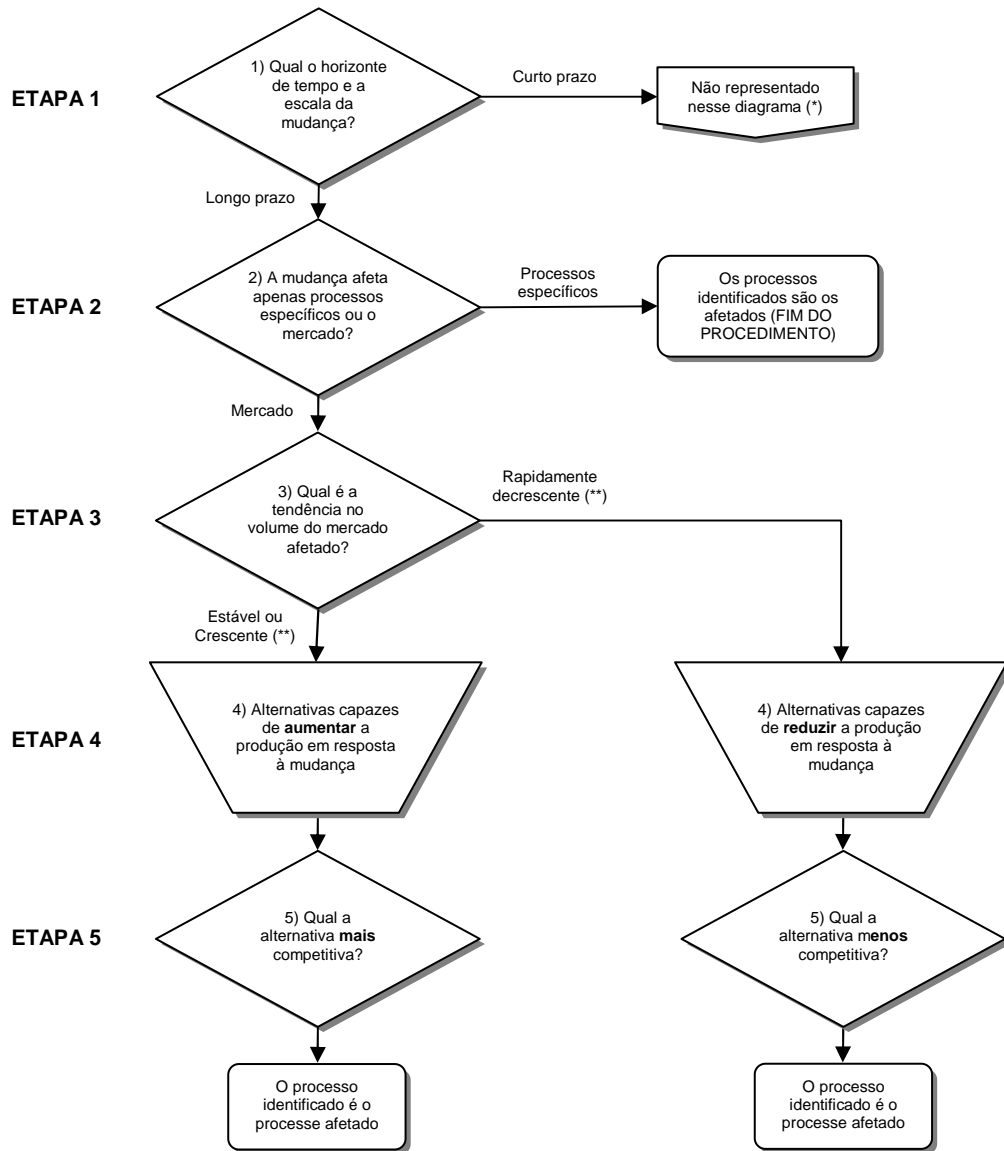
3.2 DELIMITAÇÃO DO SISTEMA EM ACV CONSEQÜENCIAL

O procedimento apresentado nessa seção visa identificar os processos afetados²¹ por uma mudança na demanda de determinado produto, procedimento também denominado de delimitação do sistema em ACV conseqüencial. Esse procedimento foi repetidamente proposto por Weidema, Frees e Nielsen (1999), Weidema (2003), Ekvall e Weidema (2004), Weidema e Ekvall (2009). Todas as informações contidas nessa seção foram extraídas desses trabalhos, exceto quando indicado.

A metodologia baseia-se em três pontos principais: tendência de mercado, restrições de fornecimento e custos de produção. O procedimento não leva em consideração curvas de aprendizagem, efeito rebote e modelos econômicos de equilíbrio (APÊNDICE C). De acordo com os autores, uma análise detalhada de todas as tecnologias afetadas na modelagem expandida de ICV seria extremamente trabalhosa. Sugere-se, portanto, um procedimento simplificado, que busca identificar as situações mais relevantes para o estudo.

²¹ O termo “processos afetados” refere-se, aqui, a alterações nos fluxos de entradas e saídas de determinado processo industrial causadas por uma mudança no sistema investigado. Os termos “tecnologias afetadas” e “fornecedores afetados” são usados com o mesmo significado.

O procedimento é composto de cinco etapas, ilustradas na Figura 9. As primeiras três (etapas 1-3) visam descrever a situação na qual a mudança ocorre, e as duas últimas (etapas 4-5) identificam a tecnologia afetada.



(*) No longo prazo a mudança afeta a capacidade de produção (investimentos) e no curto prazo afeta a capacidade existente de produção. No curto-prazo, sempre a alternativa menos competitiva é a afetada.

(**) A opção “decrésciente” somente é considerada se o volume de mercado apresenta queda superior à queda resultante da desativação planejada de bens de capital. Conseqüentemente, a opção “crescente” deve também ser considerada quando a queda no volume de mercado ocorre a uma taxa menor do que a taxa regular de reposição de bens de capital.

Figura 9 – Fluxograma para identificação de processos afetados

Fonte: Weidema, Frees e Nielsen (1999), Weidema (2003)

As etapas do procedimento mostrado na Figura 9 serão detalhadas a seguir.

3.2.1 Horizonte de tempo e escala da mudança estudada

A identificação da escala da mudança e do horizonte de tempo do estudo são passos iniciais para a delimitação dos prováveis processos afetados.

3.2.1.1. Escala da mudança estudada

A mudança pode ser considerada pequena ou grande. Uma mudança é definida como pequena (ou marginal) quando não afeta os parâmetros determinantes do mercado, como, por exemplo, a tendência do mercado (crescente ou decrescente), as restrições de produção, os custos de produção, etc. Nesse caso, as conseqüências podem ser consideradas lineares em relação ao tamanho da mudança. Além disso, os mesmos processos serão afetados, independentemente do sentido da mudança na demanda pelo produto de interesse (aumento ou redução).

Por outro lado, uma mudança é definida como grande quando afeta os parâmetros do mercado. Com isso, a mudança estudada não pode ser considerada marginal e não há linearidade entre o tamanho da mudança e suas conseqüências. Nesse caso, é necessário levar em conta o sentido da mudança porque aumentos ou reduções no volume de produção podem afetar diferentes processos. Típicos exemplos de grandes mudanças são a introdução de novas tecnologias ou uma nova regulamentação de mercado.

Estudos de ACV acerca de pequenas mudanças são mais freqüentes. Desse modo, como regra, quando não há informação disponível para determinar se a mudança é pequena ou grande, é aconselhável assumir que o tamanho da mudança é pequeno.

3.2.1.2. Horizonte de tempo das conseqüências da mudança

O horizonte de tempo do estudo pode ser de curto prazo ou longo prazo. Nas mudanças com efeitos de curto prazo a utilização da capacidade de produção varia, mas a capacidade permanece constante. Por outro lado, nas mudanças com efeitos de longo prazo, a capacidade de produção se adapta à mudança. Mudanças na capacidade de produção dizem respeito a investimentos, como a instalação de novas máquinas, ou a desativação de máquinas antigas.

A maioria das mudanças tem conseqüências no curto prazo e também no longo prazo. Decisões com efeitos somente de longo prazo são exceções; esses são casos de investimentos planejados com bastante antecedência. Da mesma forma, decisões com efeitos apenas no curto prazo ocorrem em situações excepcionais, tais como: mudanças sem efeitos sobre a produção, indústrias em declínio e mercados monopolizados. Nessas situações, investimentos em bens de capital são pouco prováveis.

Normalmente as avaliações de ciclo de vida estudam mudanças com conseqüências de longo prazo. Isso ocorre porque na maioria dos casos espera-se que, de uma ótica ambiental, esses efeitos sejam mais relevantes, tendo em vista que podem ser considerados permanentes, como, por exemplo, a ampliação de uma fábrica. Além disso, a somatória de decisões individuais com conseqüências no curto prazo acaba contribuindo para as decisões de investimentos. Em razão do exposto, quando não houver informação disponível, é aconselhável assumir que o efeito da mudança estudada é de longo prazo.

3.2.2 A mudança afeta processos específicos ou o mercado?

Se as mudanças decorrentes do volume de produção afetam somente unidades de processo específicas, então as unidades de processo afetadas já estão identificadas. Esses são casos onde os volumes de produção de fornecedores específicos flutuam com a demanda de clientes específicos. Exemplos desta situação podem ocorrer quando:

- a) produtos têm baixo preço e elevado peso; neste caso os custos de transporte viabilizam apenas fornecedores locais;
- b) quando duas ou mais empresas possuem forte relacionamento e confiança;
- c) quando um fornecedor desenvolve um produto exclusivo para determinado cliente;

Se o volume de produção dos fornecedores específicos identificados tem capacidade para responder à mudança estudada, então o procedimento termina aqui. No entanto, se a mudança na demanda interage com o mercado, o procedimento deve prosseguir visando identificar as tecnologias afetadas no mercado.

Um caso que ilustra a situação acima descrita é a produção própria de eletricidade em uma determinada fábrica (EKVALL; TILLMAN; MOLANDER, 2005). Essa situação hipotética é ilustrada pela Figura 10.

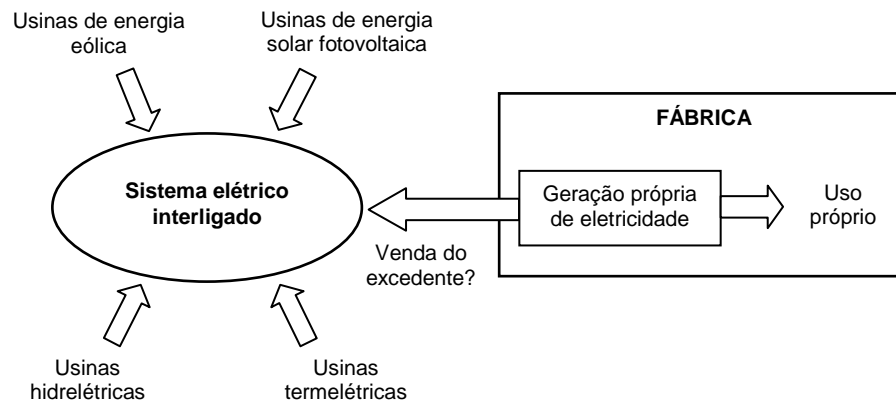


Figura 10 – As mudanças afetam processos específicos ou o mercado

Fonte: Baseado em Ekvall, Tillman e Molander (2005)

Na Figura 10 pode-se observar que, desde que o gerador esteja isolado do mercado, a produção própria de eletricidade pode ser considerada a fonte afetada por uma mudança no consumo de energia da fábrica. Assim, a produção própria flutua com a demanda própria e não há conseqüências sobre o mercado de eletricidade. No entanto, se o gerador próprio estiver conectado ao sistema elétrico para venda de excedente, o fornecedor de energia afetado por uma mudança no consumo de energia da fábrica é a tecnologia mais sensível à mudança dentro do mercado de eletricidade. Essa tecnologia mais sensível é que, no fim das contas, supriria o consumo adicional no sistema elétrico provocado pela redução do excedente de energia vendido pela fábrica. A identificação dessa tecnologia seria realizada por meio das etapas seguintes do procedimento.

Como regra, quando não há informação disponível para afirmar que fornecedores específicos serão afetados, é aconselhável supor que o mercado será afetado, visto que essa é a situação típica.

3.2.3 Tendência do mercado

A tendência do segmento de mercado analisado - crescimento ou declínio - determina a maneira como ele é afetado por uma mudança na demanda. É importante salientar que interessa, aqui, a tendência do mercado, não o sentido da mudança na demanda - aumento ou redução - decorrente da decisão específica que está sendo estudada. Como estudos de ACV normalmente lidam com mudanças pequenas, em que a relação entre mudanças e conseqüências é linear, os mesmos fornecedores serão afetados por um aumento ou uma redução na demanda. Nos casos de mudanças pequenas os fornecedores afetados somente variam se a tendência do mercado mudar de crescente para decrescente ou vice-versa.

Como regra, quando não houver informação a respeito da tendência de mercado, é aconselhável assumir que o mercado é estável ou crescente. Essa é a situação geral da maioria dos produtos devido ao aumento geral da riqueza e ao crescimento populacional mundial.

3.2.4 Restrições na produção

Ao contrário de estudos de ACV atribucionais, estudos conseqüenciais levam em conta que os mercados não são perfeitos e que os fornecedores podem não ter capacidade para alterar a produção na quantidade desejada. Com isso, o efeito da mudança será deslocado para um fornecedor alternativo que não apresenta restrições. O propósito dessa etapa é eliminar da análise as tecnologias que não possuem potencial de resposta.

Caso o mercado seja crescente ou estável, devem ser levadas em conta na análise das restrições apenas as tecnologias que podem responder a um aumento na demanda. No caso de mercado decrescente, a análise deve ser feita para as tecnologias que responderiam a uma redução na demanda. Apenas as tecnologias não restringidas seguirão para a próxima etapa do procedimento.

Podem existir diversas razões para que uma tecnologia apresente limitação na capacidade de resposta. A lista a seguir mostra alguns exemplos:

- a) restrições naturais (por exemplo, quantidade de água disponível em uma dada região);

- b) restrições de qualidade (por exemplo, requisitos mínimos de qualidade do produto);
- c) restrições políticas e econômicas (por exemplo, limites para emissões, cotas, proibição de tecnologias específicas, impostos);
- d) falta de mercado (por exemplo, mercados em declínio);
- e) processos multifuncionais (por exemplo, co-produtos dependentes);
- f) imperfeições de mercado (por exemplo, monopólios);
- g) capacidade de armazenamento do produto;
- h) infra-estrutura de transporte;
- i) capacidade de tratamento de resíduos.

Na busca pela identificação, por exemplo, do fornecedor de fertilizante afetado por mudanças na demanda, deve-se descartar o adubo animal, tendo em vista que a produção de adubo animal não é influenciada pelas mudanças na demanda por fertilizante. A produção de adubo animal depende dos mercados de carne, leite, e outros co-produtos da pecuária, visto que são esses co-produtos que oferecem lucro ao produtor de gado. Conclui-se, nesse exemplo, que a produção de fertilizante artificial sofrerá as conseqüências das alterações na demanda por fertilizante. Esse é um caso de restrição por processo multifuncional.

Como qualquer outra condição de mercado, as restrições na produção também dependem do horizonte temporal, da escala da mudança e da localização. Por isso, é importante verificar as condições nas quais as restrições são válidas. Com relação ao horizonte temporal, muitos fatores de produção podem apresentar limitações no curto prazo, onde as alterações ocorrem dentro da capacidade instalada, mas essas condições podem não valer para o longo prazo. As restrições podem variar também com a localização geográfica, em razão de diferentes políticas, escassez de recursos, etc. Quanto à escala, mudanças grandes na demanda podem alterar as condições de mercado; com isso, restrições podem deixar de existir, enquanto outras podem ser criadas. Uma grande alteração na demanda por eletricidade, por exemplo, pode influenciar as restrições políticas à geração de energia nuclear ou à energia a partir do carvão mineral. Diante disso, seria conveniente que efeitos dinâmicos sobre as restrições fossem levados em conta, mas, na prática, são muito difíceis de prever. Por isso, com objetivo de viabilizar o estudo, as restrições podem ser consideradas fixas.

Como regra, se não houver informação disponível para determinar se determinada tecnologia é restringida, é aconselhável assumir que não há restrições. Deste modo, evita-se a exclusões injustificadas. Caso haja elevada incerteza na identificação das restrições, estas podem ser analisadas em cenários separados. Se todos os fornecedores de um segmento de mercado apresentam restrições de fornecimento, as elasticidades de longo prazo podem ser utilizadas para avaliar o modo como cada tecnologia reagiria a uma mudança na demanda.

3.2.5 Tecnologias mais sensíveis à mudança

Os fornecedores afetados pela mudança estarão obrigatoriamente entre os fornecedores não restringidos selecionados anteriormente (etapa 4). Dentre esses, a identificação dos fornecedores mais sensíveis depende do horizonte de tempo do estudo (etapa 1) e da tendência atual de mercado (etapa 3).

Para efeitos no longo prazo em um mercado crescente, estável ou levemente decrescente (a uma taxa menor do que a taxa de depreciação média²² para bens de capital), nova capacidade deve ser instalada. Nessa situação, a tecnologia mais sensível é a mais competitiva. Por outro lado, para mudanças de longo prazo num mercado em queda (a uma taxa maior que a taxa de depreciação de bens de capital) o fornecedor mais sensível é o menos competitivo.

Para efeitos no curto prazo, o fornecedor afetado será o menos competitivo, normalmente utilizando tecnologia antiga, independentemente da tendência de mercado. Isso ocorre porque se assume que as tecnologias mais competitivas apresentam a maior utilização possível no curto prazo, enquanto as tecnologias menos competitivas absorvem eventuais variações na demanda.

A competitividade das tecnologias é determinada pelos custos médios de produção. Deve-se levar em conta que os custos de curto prazo não são iguais aos custos de longo prazo. A Figura 11 ilustra essas duas possibilidades.

²² A taxa de depreciação de equipamentos é determinada pelo inverso da vida útil (PINDYCK; RUBINFELD, 2005).

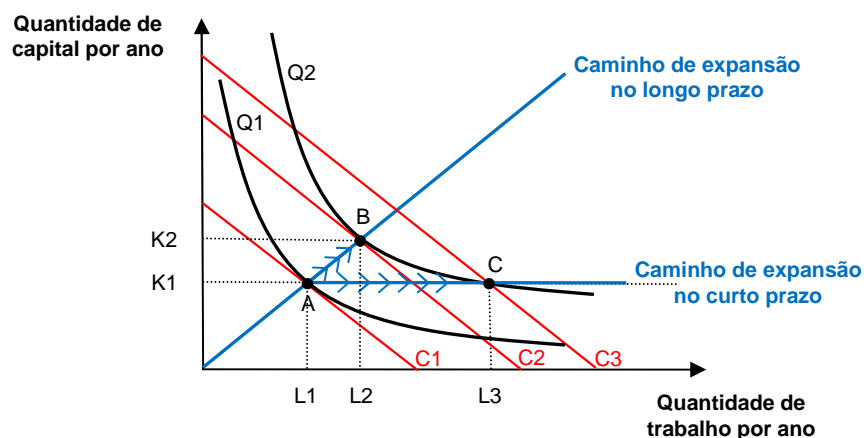


Figura 11 – Custos médios de produção no curto e no longo prazo

Fonte: Pindyck e Rubinfeld (2005)

A Figura 11 mostra uma situação hipotética de um processo produtivo em que os fatores de produção são: capital e trabalho. Pindyck e Rubinfeld (2005) denominam as curvas Q1 e Q2 de isoquantas. Cada isoquanta representa as possíveis combinações de capital e trabalho necessários para produzir uma mesma quantidade do produto final. As diferentes isoquantas representam diferentes quantidades produzidas.

Ainda conforme os mesmos autores, as linhas C1, C2 e C3 são linhas de isocusto. Cada linha de isocusto mostra as possíveis combinações de capital e trabalho que resultam num mesmo custo total. Quanto mais distantes da origem estiverem as isoquantas e as isocustos, maiores serão as quantidades produzidas e maiores os custos totais, respectivamente.

Na situação inicial apresentada pela Figura 11, são produzidas Q1 unidades do produto final. A condição ótima de produção de Q1 unidades corresponde ao ponto A, ponto onde a linha de isocusto C1 tangencia Q1. A mesma quantidade poderia ser produzida por outra combinação de insumos, mas não resultaria no custo mínimo. Quando a produção aumenta de Q1 para Q2, duas situações podem ser observadas:

- a) no curto prazo, o capital (instalações, máquinas e equipamentos) não podem ser alterados repentinamente, pois exigem um tempo mínimo para planejamento, compra, fabricação, entrega, etc. Apenas o insumo mais flexível, que nesse caso é o trabalho, pode responder à alteração na demanda. Com isso, o caminho de expansão da produção no curto

prazo cruza a curva Q2 no ponto C. A produção de Q2 unidades exigirá, portanto, K1 unidades de capital e L3 unidades de trabalho, a um custo total igual a C3. O custo médio será $C3/Q2$;

- b) no longo prazo, todos os insumos são variáveis. Dessa forma, o produtor buscará o ponto ótimo de custos. No exemplo mostrado pela Figura 11, essa situação corresponde ao ponto B. O custo total será, portanto, o custo C2, que tangencia a curva Q2, onde a quantidade de capital será K2 e a quantidade de trabalho será L2. A união dos pontos ótimos para as diversas quantidades de produção forma o caminho de expansão no longo prazo. Conclui-se que a flexibilidade no longo prazo possibilita que o fabricante obtenha uma produção com menor custo médio do que no curto prazo. No exemplo, o custo médio no longo prazo será $C2/Q2$, que é menor do que $C3/Q2$, já que $C2 < C3$.

Os custos também podem incluir externalidades²³. Obviamente, não há necessidade de incluir os custos que não influenciam a decisão sob análise. Investidores privados, por exemplo, podem colocar menos ênfase em externalidades ambientais do que investidores públicos (FRISCHKNECHT²⁴, 1998, *apud* WEIDEMA, 2003). Em outras palavras, se um investidor privado é o público-alvo de um estudo, provavelmente externalidades ambientais não serão relevantes, ao menos para ele, na tomada de decisão entre alternativas de investimento.

Em alguns casos, várias tecnologias podem competir ao mesmo custo. Nessa situação, os efeitos de uma mudança atingem um conjunto de tecnologias, mesmo quando o estudo considera apenas efeitos de curto prazo ou de longo prazo. Um ICV mais correto é obtido, nesse caso, se cada tecnologia afetada for incluída na proporção da sua elasticidade de preço da oferta.

Como regra, quando não for possível obter dados sobre custos, pode-se assumir que a tecnologia mais moderna é a mais competitiva e a mais antiga é a

²³ A atuação dos consumidores ou dos produtores pode resultar em custos, ou benefícios, que não se encontram refletidos no preço de mercado. Esses custos ou benefícios são denominados externalidades, pois são externos ao mercado. Um exemplo é o custo que a sociedade paga pela poluição ambiental causada por determinada indústria e que, normalmente, não é incorporado aos preços dos produtos (PINDYCK; RUBINFELD, 2005). Pode-se argumentar que de qualquer maneira a sociedade é que paga. A internalização, no entanto, reduz a competitividade do produto mais poluidor, que é o objetivo buscado.

²⁴ FRISCHKNECHT, R. **Life cycle inventory analysis for decision-making: scope-dependent inventory system models and context-specific joint product allocation**. PhD thesis - Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 1998.

menos competitiva. Outra forma de simplificar a análise é assumir que a competitividade é determinada pelos custos do mais importante fator de produção, como custos da mão-de-obra (levando-se em conta a produtividade), energia, matéria-prima, etc.

O Quadro 4 resume o procedimento para determinação das tecnologias mais sensíveis às mudanças.

Horizonte temporal	Tendência de mercado	Tecnologia afetada
Longo prazo	Mercado crescente (ou decrescente a uma taxa inferior à taxa de depreciação)	Mais competitiva
	Mercado decrescente a uma taxa superior à taxa de depreciação	Menos competitiva
Curto prazo	Mercado crescente	Menos competitiva
	Mercado decrescente	

Quadro 4 – Identificação da tecnologia afetada

Fonte: Adaptado de Weidema, Frees e Nielsen (1999), Weidema (2003), Ekvall e Weidema (2004), Weidema e Ekvall (2009)

É importante lembrar que são mais comuns estudos de mudanças de pequena escala em ACV, em que há linearidade entre mudança e consequência. Sendo assim, a tecnologia afetada será a mesma, independentemente do sentido da mudança na demanda (aumento ou redução).

Para um estudo acerca do longo prazo com tendência crescente do mercado, um aumento na demanda provocaria a instalação da tecnologia mais competitiva, que nesse caso é a tecnologia afetada, como resumido no Quadro 4. Se no lugar de aumento ocorresse uma redução na demanda, isso levaria a uma pequena redução na taxa de crescimento do mercado. Conclui-se, assim, que a tecnologia afetada é a mesma, tendo em vista que a consequência dessa redução seria que uma parcela dessa tecnologia mais competitiva deixaria de ser instalada.

Para um estudo acerca do longo prazo com tendência decrescente (a uma taxa superior a taxa de depreciação) a análise é similar. Uma redução na demanda provocaria a desativação da tecnologia menos competitiva, que nesse caso é a tecnologia afetada, como mostra o Quadro 4. Se no lugar de redução ocorresse um aumento na demanda, isso levaria a uma pequena redução na taxa de retração do

mercado. A tecnologia afetada é a mesma tecnologia (menos competitiva), já que a consequência desse crescimento na demanda é que uma parcela dessa tecnologia deixaria de ser desativada.

Para a situação de curto prazo, e sendo a mudança pequena, a tecnologia afetada sempre é a menos competitiva, independentemente da tendência de mercado e do sentido da mudança.

3.3 PROCEDIMENTO PARA PROCESSOS MULTIFUNCIONAIS

As considerações dessa seção, acerca de processos multifuncionais em ACV consequencial, foram repetidamente apresentadas por Weidema (2003), Weidema e Ekvall (2009). As informações apresentadas a seguir foram extraídas desses trabalhos, exceto quando indicado.

Processos multifuncionais em ACV consequencial freqüentemente são divididos em duas categorias: produção combinada e produção conjunta (HUPPES²⁵, 1992, *apud* WEIDEMA, 2003). Na produção combinada os volumes dos co-produtos podem ser independentemente variados e, por isso, as consequências de mudanças em uma das saídas podem ser determinadas simplesmente variando-a, enquanto as demais permanecem fixas. Na produção conjunta o volume relativo dos co-produtos é fixo. Dito de outra forma, na produção conjunta a fabricação de um co-produto acarreta, obrigatoriamente, na produção simultânea dos outros co-produtos e a expansão do sistema é a única maneira de lidar com o processo multifuncional. O procedimento aqui apresentado tem o objetivo de tratar deste tipo de situação.

Os co-produtos de uma produção conjunta são classificados em co-produtos determinantes e co-produtos dependentes. Essa classificação depende da importância comercial relativa de cada co-produto. Os co-produtos dependentes, em razão da sua baixa atratividade comercial, não responderão a uma mudança na demanda. No APÊNDICE D são feitas considerações acerca de como encontrar o co-produto determinante de um processo multifuncional.

²⁵ HUPPES, G. Allocating impacts of multiple economic processes in LCA. In: **SETAC-Europe: Life-cycle assessment**. Brussels: Society for Environmental Chemistry and Toxicology, 1992.

O volume de produção de co-produtos dependentes é alterado somente com a variação na demanda do co-produto determinante. Conclui-se, portanto, que o co-produto determinante constitui uma restrição no volume de produção dos outros co-produtos. Quando essa hipótese for considerada incerta ou muito simplificadora, diferentes cenários podem ser desenvolvidos visando abranger várias situações possíveis.

3.3.1 Modelo teórico de expansão do sistema para processos multifuncionais

Ao tratarmos de processos multifuncionais em ACV consequencial, a questão a ser respondida é: como o volume de produção e as demais entradas e saídas do processo serão afetados por uma mudança na demanda para o co-produto de interesse do estudo?

Um modelo teórico de expansão do sistema é mostrado na Figura 12. O modelo é uma simplificação, pois inclui apenas um co-produto determinante e um co-produto dependente; na prática podem existir diversos co-produtos de cada tipo. Além disso, nesse exemplo, apenas um processo envolvido é multifuncional.

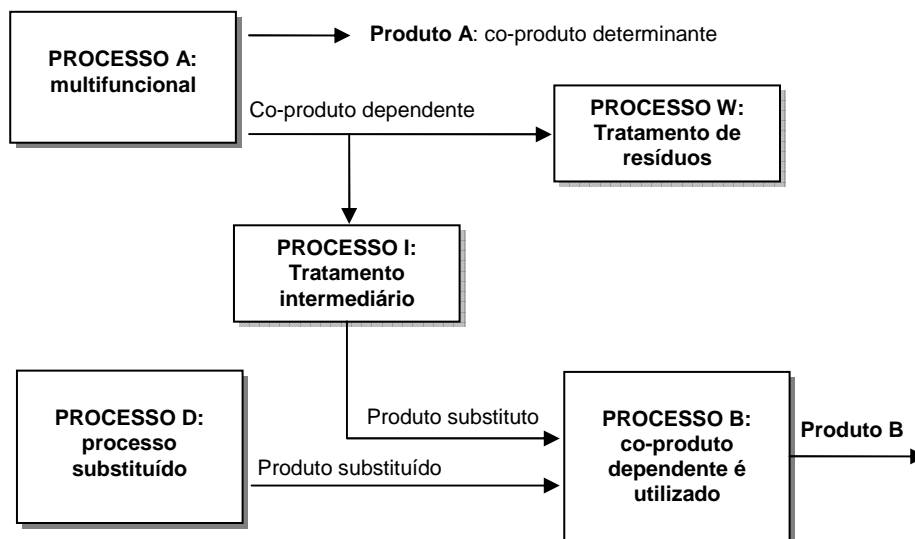


Figura 12 – Modelo teórico para processos multifuncionais

Fonte: Weidema (2003), Weidema e Ekvall (2009)

A seguir será feita uma análise, ilustrativa, do modelo teórico da Figura 12, considerando as seguintes premissas:

- a) o produto A é o produto de interesse ou o produto B é o produto de interesse do estudo;
- b) o produto de interesse sofre aumento na demanda;
- c) o co-produto dependente é aproveitado totalmente ou parcialmente, e essa situação não varia em função da mudança na demanda;
- d) o co-produto dependente, fornecido pelo processo A, possui baixo valor econômico e é um substituto prioritário do produto D.

Em função de diferentes condições, diferentes processos são afetados por mudanças na demanda. A seguir serão descritas algumas das possíveis situações e os processos afetados de acordo com as premissas relacionadas acima. Com objetivo de simplificação, a análise assume que a mudança na demanda estudada não altera outras condições iniciais: a demanda do outro produto final (produto A ou produto B), o aproveitamento do co-produto permanece total ou parcial, e o co-produto dependente no processo A continua sendo substituto prioritário do processo D.

Situação 1: o objetivo é identificar os processos afetados por um incremento na demanda pelo produto A, sabendo-se que o co-produto dependente é totalmente aproveitado. Primeiramente, como o produto A é o co-produto determinante do processo multifuncional, uma mudança em sua produção automaticamente afeta o volume do co-produto dependente. O co-produto dependente é totalmente aproveitado e sua produção, mesmo após a mudança, é menor ou igual à demanda do processo B. Conclui-se, portanto, que o tratamento de resíduos (processo W) não é afetado pela alteração na demanda do produto A. O volume do tratamento intermediário (I) e a quantidade fornecida pelo processo (D) aumentam a produção. O volume do processo B não é afetado, já que sua demanda permanece constante. O processo B recebe a mesma quantidade total de insumos, ainda que a participação dos fornecedores varie (mais do processo A+I e menos do processo D).

Situação 2: o objetivo é identificar os processos afetados por um incremento na demanda pelo produto B, sabendo-se que o co-produto dependente é totalmente aproveitado. Nessa situação, o aumento na demanda pelo produto B não será capaz de influenciar os processos A+I, pois esses processos são dependentes exclusivamente da demanda pelo produto A. Assim, apenas o processo D sofrerá as conseqüências da variação na demanda do processo B.

Situação 3: o objetivo é identificar os processos afetados por um incremento na demanda pelo produto A, sabendo-se que o co-produto dependente é parcialmente aproveitado. Como o co-produto dependente é parcialmente aproveitado, sua produção é maior que a demanda do processo B. Isso significa que parte do co-produto dependente segue para o tratamento de resíduos (processo W). Por conseguinte, qualquer aumento no volume de produção do co-produto determinante, implica em maior volume do co-produto dependente que segue para o tratamento de resíduos (processo W). O tratamento intermediário (processo I) não é afetado, já que o processo B está sendo plenamente atendido e sua demanda não se altera. O processo D também não sofre alteração.

Situação 4: o objetivo é identificar os processos afetados por um incremento na demanda pelo produto B, sabendo-se que o co-produto dependente é parcialmente aproveitado. Da mesma forma que na situação anterior, o co-produto dependente é parcialmente aproveitado, de modo que a produção excedente segue para o tratamento de resíduos (processo W). Um aumento na demanda pelo produto B resulta num aumento da quantidade destinada ao tratamento intermediário (processo I) e uma correspondente redução do co-produto dependente destinado ao tratamento de resíduos (processo W). Isso ocorre porque o tratamento intermediário (processo I) é o fornecedor mais sensível a uma maior demanda no processo B. O fornecedor D não sofre conseqüências.

As situações descritas acima e os processos afetados estão resumidos no Quadro 5. O sinal positivo indica incremento e o sinal negativo indica redução.

Análise de processos afetados	Processos afetados por um incremento na demanda pelo produto A	Processos afetados por um incremento na demanda pelo produto B
Produção do co-produto dependente é menor ou igual à demanda do processo B (co-produto dependente é totalmente aproveitado)	+ A + I - D	+ B + D
Produção do co-produto dependente é maior que a demanda do processo B (co-produto dependente não é totalmente aproveitado)	+ A + W	+ B + I - W

Quadro 5 – Tecnologias afetadas no modelo teórico multifuncional

Fonte: Adaptado de Weidema (2003), Weidema e Ekvall (2009)

Vale ressaltar que a análise resumida no Quadro 5 refere-se às condições pré-definidas. Diversas outras situações podem ocorrer; por exemplo, em lugar de aumento da demanda pode-se analisar uma redução. Outro exemplo é uma mudança na demanda de tal magnitude que leve o sistema de uma condição de aproveitamento total para uma condição de aproveitamento parcial do co-produto determinante.

É importante lembrar que a substituição deve considerar as diferenças de propriedades irrelevantes para o mercado que porventura existam entre produto substituído e produto substituto - no exemplo acima os produtos D e I respectivamente.

As condições de mercado é que determinam os parâmetros iniciais do sistema. Essas condições podem variar ao longo do tempo, em função da localização geográfica e da escala da mudança. Em casos de elevada incerteza, aconselha-se que sejam desenvolvidos cenários.

Um último ponto a considerar é uma possível dúvida se determinada saída é co-produto ou resíduo. Havendo dúvida a esse respeito, a saída deve ser sempre considerada um co-produto dependente. Se ocorrer um erro nesse julgamento, o próprio procedimento se encarregará de corrigi-lo, pois o resíduo não deslocará outro produto no mercado. Nesse contexto, um resíduo pode ser definido como um co-produto dependente que não substitui outro produto.

3.3.2 Situações complexas

O modelo teórico apresentado na seção anterior é bastante simples. Na prática, situações mais complexas relacionadas aos processos multifuncionais podem ocorrer, como:

- a) o processo multifuncional possui mais do que dois co-produtos;
- b) o processo intermediário (processo I na Figura 12) resulta em mais de um produto
- c) os co-produtos dependentes têm outras aplicações, além do processo B (Figura 12);
- d) o processo deslocado (processo D na Figura 12) tem múltiplos produtos.

É bastante comum encontrar processos multifuncionais com mais de dois co-produtos. Ao estudar uma mudança na produção de um co-produto determinante que pertence a um processo multifuncional com mais de um co-produto dependente, as conseqüências para cada co-produto dependente podem ser analisadas isoladamente, uma de cada vez. Da mesma forma, na situação com múltiplos produtos determinantes, a análise deve ser realizada separadamente para cada um dos co-produtos determinantes.

A segunda situação refere-se a múltiplos co-produtos dependentes resultantes de um processo intermediário (processo I na Figura 12). Essa situação decorre da subdivisão de um co-produto dependente em dois ou mais produtos diferentes. Cada fração resultante pode ser totalmente utilizada em outros processos ou apenas parcialmente, e pode ser estudada separadamente.

A terceira situação refere-se a co-produtos dependentes que apresentam várias possibilidades de aplicação. Diante disso, o processo a ser considerado na expansão do sistema é a aplicação mais sensível a uma mudança na oferta.

A última situação refere-se aos casos de processos substituídos que também são multifuncionais, os quais obrigam a repetição do procedimento para cada um dos processos multifuncionais. Essa possibilidade é ilustrada na Figura 13.

deslocado, em vez de um produto determinante, a análise termina nesse ponto porque, como visto anteriormente, o processo multifuncional não é afetado por uma alteração na demanda pelo co-produto dependente.

3.4 AVALIAÇÃO CONSEQUENCIAL DO USO AGRÍCOLA DO SOLO

Conforme Kløverpris, Wenzel e Nielsen (2008), Schmidt (2008), estudos de ACV de produtos agrícolas geralmente adotam a abordagem atribucional, que inclui somente as intervenções na área plantada. Esses estudos não levam em consideração efeitos indiretos, fora da área utilizada para produção. Nesse contexto, ACVs consequenciais podem fornecer resultados mais completos.

De acordo com Kløverpris, Wenzel e Nielsen (2008), Kløverpris, Baltzer e Nielsen (2010), o aumento na produção de determinado produto agrícola conta com dois mecanismos: intensificação²⁶ e expansão da área. Isso pode ser expresso pela equação (1), apresentada abaixo.

$$\Delta Q = \Delta Q_A + \Delta Q_i = Y \cdot \Delta A + \Delta Y (A + \Delta A) \quad (1)$$

onde,

- ΔQ mudança total no volume de produção de determinado produto agrícola
- ΔQ_A mudança na produção provocada por alteração da área plantada
- ΔQ_i mudança na produção provocada por mudança na intensidade
- A área agrícola inicial de determinado produto
- Y produtividade inicial média por hectare
- ΔY mudança na produtividade média por hectare
- ΔA mudança na área agrícola

Cada um destes dois mecanismos de aumento da produção tem diferentes implicações, que resultam em diferentes impactos ambientais. A expansão de áreas está relacionada ao mercado de terras e ao desmatamento de áreas naturais. A intensificação está ligada ao mercado de insumos agrícolas (fertilizantes, pesticidas

²⁶ O termo intensificação, nesse contexto, significa aumento da produtividade agrícola.

e irrigação) e ao desenvolvimento tecnológico (máquinas agrícolas, variedades de plantas e práticas agrícolas).

O preço do produto é o principal fator determinante da composição dos mecanismos da produção. O preço inclui, além dos custos de produção, custos de transporte e possíveis custos de transações comerciais. Em função do preço, estabelece-se a localização geográfica da demanda e da oferta. Se os custos de transporte e transações comerciais forem elevados, pode ser mais lucrativo, por exemplo, comprar de produtores locais, resultando numa determinada composição de mecanismos de produção. Com a globalização comercial, entretanto, alguns países têm removido, ou reduzido, as barreiras comerciais por meio de acordos para a integração econômica, permitindo um fluxo mais intenso de mercadorias entre os países-membro desses acordos. Esse aspecto pode induzir a outra forma de atender a demanda, com distintos impactos ambientais.

4 RESULTADOS

Neste capítulo a metodologia será aplicada para o caso do biodiesel no Brasil, visando determinar qual a matéria-prima marginal e as consequências diretas e indiretas, especificamente com relação ao uso do solo, para atender a mudança no volume de produção de biodiesel, considerando a demanda nacional atual e a demanda prevista para o ano de 2030.

4.1 UNIDADE FUNCIONAL E FLUXO DE REFERÊNCIA

O objetivo é realizar um inventário consequencial do uso do solo para produção de matéria-prima de origem agrícola visando atender a mudança na produção nacional de biodiesel entre 2010 e 2030. Assume-se que o atual nível tecnológico da fase industrial permanecerá inalterado nesse período, sem ganhos de produtividade. Primeiramente deve-se determinar a unidade funcional e o fluxo de referência (conforme método descrito na seção 3.1).

- a) Segmentação de interesse:
 - mercado: óleos vegetais;
 - segmento do mercado de óleos vegetais: matéria-prima para produção de biodiesel pela reação de transesterificação utilizando a rota metílica;
 - Segmentação geográfica: mercado brasileiro;
- b) Produtos alternativos: principais plantas oleaginosas provenientes da atividade agrícola. De acordo com Peres e Beltrão (2006), Castro, Lima e Silva (2010), MAPA (2011), as principais oleaginosas para produção de biodiesel são: soja, dendê, girassol, algodão, amendoim, mamona e canola. São consideradas principais porque há domínio tecnológico sobre essas matérias-primas. Deve-se ressaltar, entretanto, que há outras culturas com potencial para produção de biodiesel, mas ainda sem domínio tecnológico, por exemplo: babaçu, pinhão-manso, macaúba, tucumã e inajá. Diversas instituições de pesquisa e de fomento estão promovendo um grande esforço para o domínio tecnológico dessas e outras espécies potenciais. As espécies sem domínio tecnológico não serão consideradas no presente estudo;
- c) Propriedades:

- obrigatórias: plantas oleaginosas que, isoladas ou em combinação, permitam a obtenção de biodiesel em conformidade com os requisitos técnicos exigidos pela legislação. As especificações técnicas do biodiesel no Brasil são determinadas pela Resolução nº 7 da ANP, de 19/03/2008. Conforme Medina (2008), o biodiesel produzido apenas com mamona não atende a Resolução nº 7 em virtude da elevada viscosidade. De acordo com a mesma reportagem, a ANP afirma que essa é a única matéria-prima que não se enquadra nos parâmetros técnicos para produção de biodiesel, mas sua utilização é possível desde que o óleo de mamona seja misturado a outro óleo vegetal ou material gorduroso. Para ANP (2010), a mamona, se usada em mistura com outros óleos, agrega propriedades positivas ao biodiesel, como a redução do ponto de congelamento, sem alterar as especificações exigidas. Em contraste, Garagorry *et al.* (2010) mencionam que a utilização de óleo de mamona para fins energéticos deve ser vista com cautela, pois sua aplicação na indústria química agrega mais valor ao produto. Dentre essas aplicações estão: fabricação de graxas e lubrificantes, tintas, vernizes, espumas e materiais plásticos. Diante da incerteza acerca da viabilidade do uso da mamona como matéria-prima para produção de biodiesel, a mesma foi excluída do presente estudo. Desse modo, as oleaginosas pré-selecionadas para esse estudo que possuem as propriedades obrigatórias são: soja, dendê, girassol, algodão, amendoim e canola;
- irrelevantes para o segmento de mercado: duas classes estão sendo consideradas: (a) co-produtos, além do óleo, e (b) outras aplicações do óleo, além de matéria-prima para biodiesel. Essas propriedades são mostradas nas Figuras 14 a 19, para cada uma das matérias-primas selecionadas para o estudo.
- posicionamento: propriedades de posicionamento não estão sendo levadas em conta nesse estudo.

- d) Unidade de análise²⁷: a previsão da demanda para o ano de 2030 é de 13,6 milhões m³/ano de biodiesel²⁸. A produção no ano de 2010 foi de 2,4 milhões m³/ano (ANP, 2011). Com isso, será necessário um incremento de 11,2 milhões m³/ano de biodiesel e a unidade de análise é igual a 10,8 milhões m³/ano de óleo vegetal²⁹;

A seguir, as Figuras 14 a 19 mostram os processos multifuncionais de cada uma das matérias-primas selecionadas para esse estudo: soja, algodão, girassol, canola, dendê e amendoim. São apresentados os co-produtos, suas aplicações principais e os percentuais teóricos (em massa). Para cada processo multifuncional também é indicado o co-produto determinante.

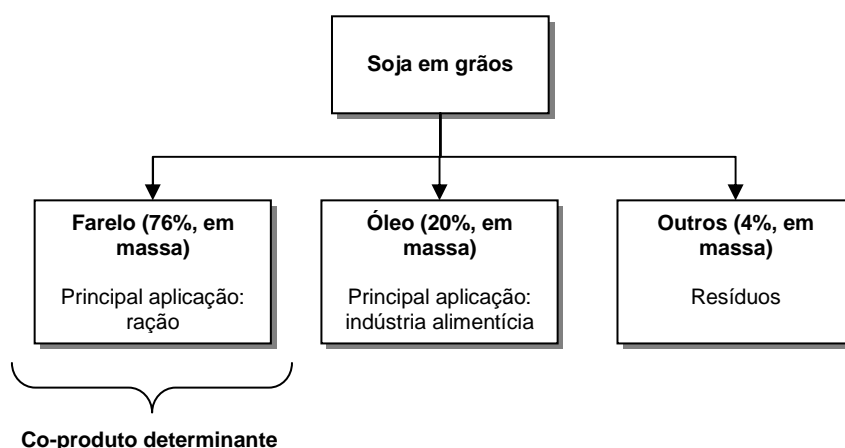


Figura 14 – Co-produtos da soja

Fonte: baseado em Castro, Lima e Silva (2010) e MAPA (2011)

²⁷ Há estudos cujo produto em análise é um produto final e outros em que o produto de interesse é um produto intermediário. Diante disso, WRI (2011) utiliza o conceito de "unidade de análise". Caso o estudo de ACV tenha como foco um produto final, então a unidade de análise é a unidade funcional. Entretanto, se o foco do estudo for um produto intermediário, então a unidade de análise é o fluxo de referência e, nesse caso, não há unidade funcional. Uma explanação detalhada sobre unidade funcional, fluxo de referência e unidade de análise pode ser consultada no APÊNDICE B.

²⁸ De acordo com MME (2007), entre diversas hipóteses, o cenário de maior demanda de biodiesel em 2030 é de 10,76 milhões tep (toneladas equivalentes de petróleo). Conforme EPE (2011), 1m³ de biodiesel corresponde a 0,792 tep.

²⁹ Gerpen *et al.* (2004) demonstram que a reação de transesterificação, pela rota metílica, produz uma quantidade de biodiesel cujo volume e massa são, respectivamente, 3,3% e 0,45% maiores que a quantidade de óleo vegetal utilizado na reação.

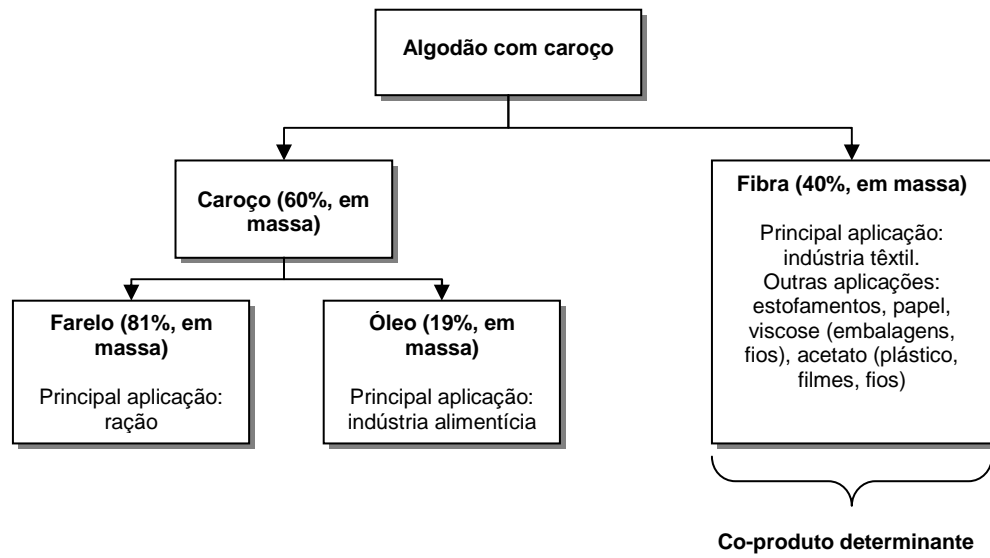


Figura 15 – Co-produtos do algodão
 Fonte: baseado em MAPA (2007) e MAPA (2011)

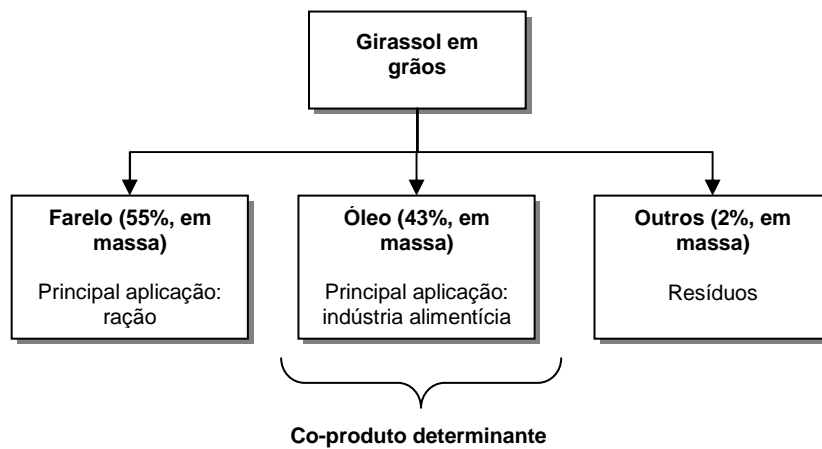


Figura 16 – Co-produtos do girassol
 Fonte: baseado em Oliveira e Vieira (2004), Castro, Lima e Silva (2010) e MAPA (2011)

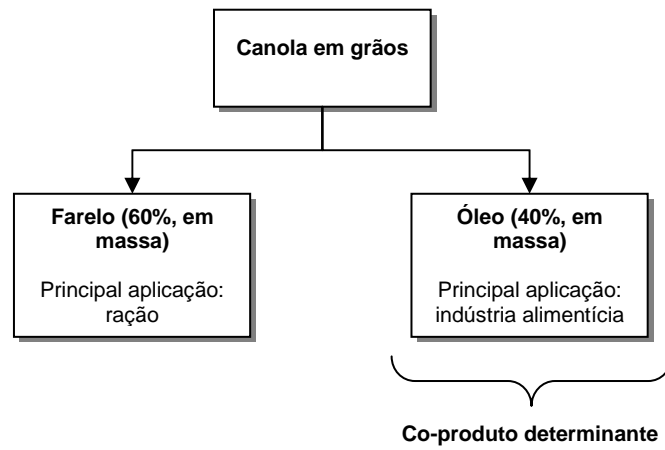


Figura 17 – Co-produtos da canola

Fonte: baseado em Tyson *et al.* (2004) e Tomm *et al.* (2009)

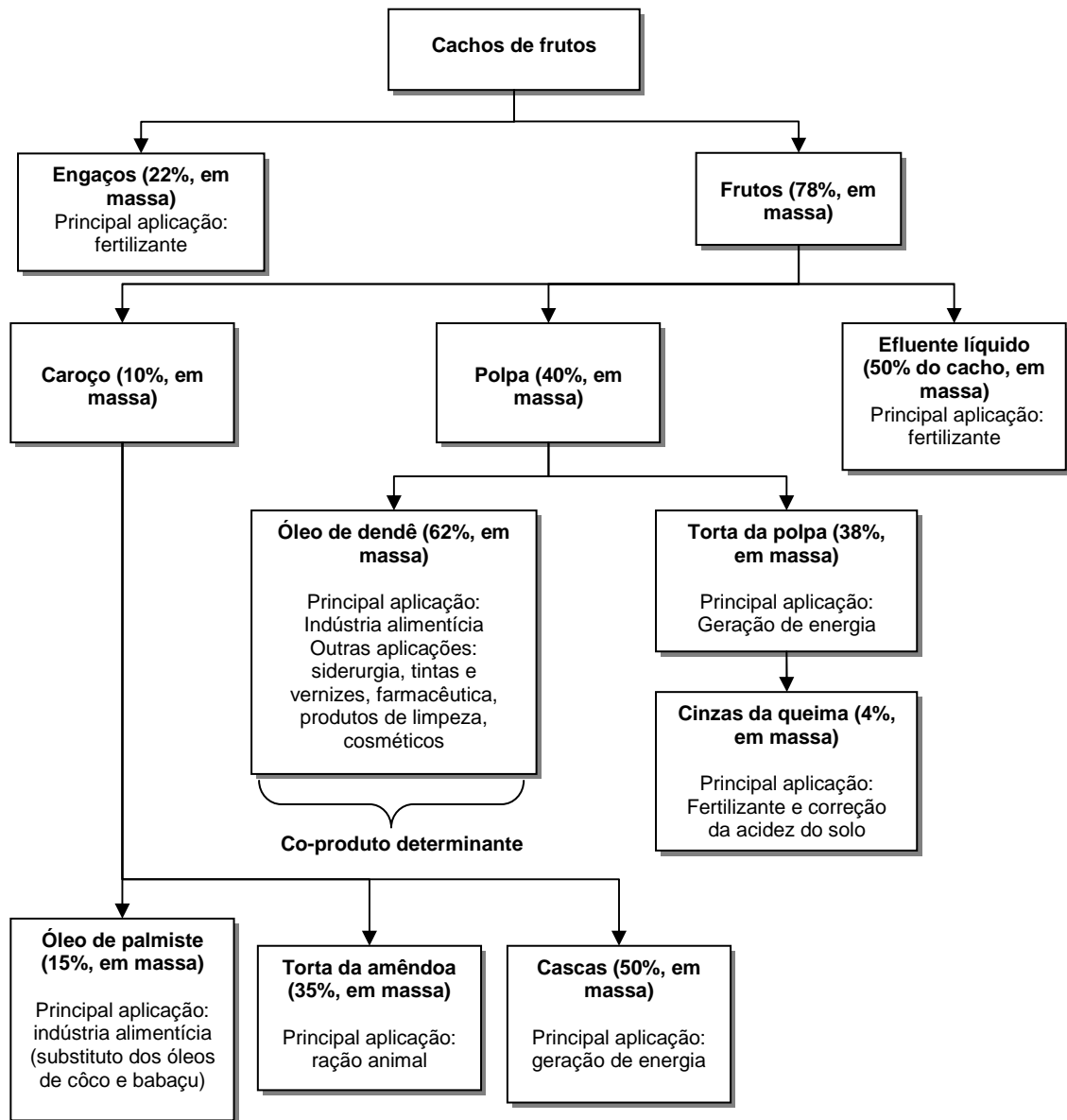


Figura 18 – Co-produtos do dendê

Fonte: baseado em Barcelos (1995), Furlan Junior (2006) e Castro, Lima e Silva (2010)

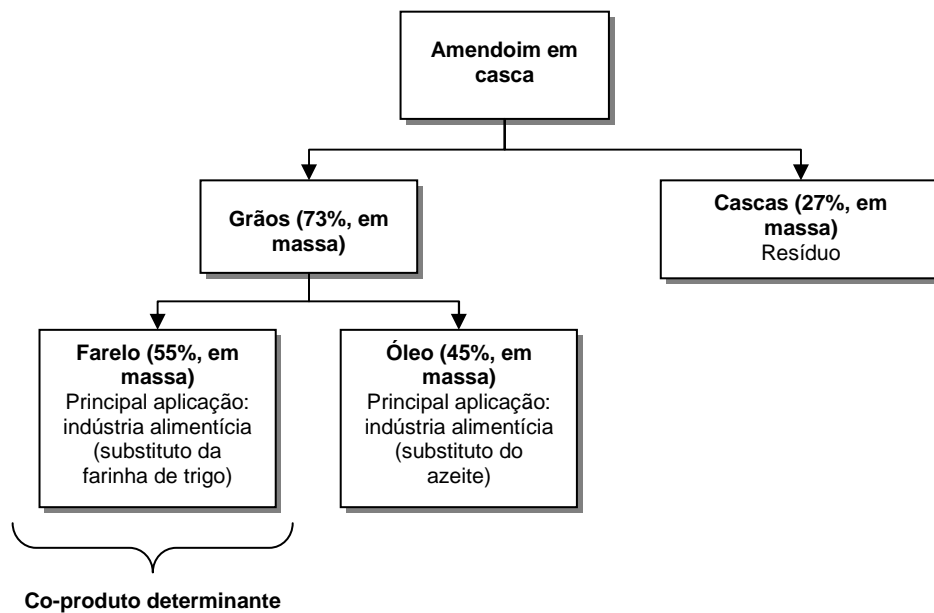


Figura 19 – Co-produtos do amendoim

Fonte: baseado em Embrapa (2006) e MAPA (2011)

4.2 DELIMITAÇÃO DO SISTEMA

Nesta seção serão determinados os sistemas de produto afetados pela mudança na demanda de biodiesel (conforme o método apresentado na seção 3.2).

- a) Escala da mudança, pequena ou grande? Assume-se, aqui, que a mudança é pequena, pois essa é a situação típica. Isso significa que a mudança não afeta os parâmetros do mercado, tais como: custos de produção, restrições de produção, regulamentação governamental, entre outros.
- b) Horizonte temporal, de curto-prazo ou de longo-prazo? Assume-se, nesse caso, que a mudança tem efeitos no longo-prazo, pois essa é a situação típica. De uma ótica ambiental, os efeitos de longo prazo são os mais relevantes, já que envolvem novos investimentos. Aqui, o foco é a ampliação de áreas agrícolas.
- c) A mudança afeta alternativas específicas ou o mercado? A mudança na demanda afeta o mercado. Apesar de o estudo ter delimitado o mercado de óleos vegetais em seis alternativas (soja, algodão, amendoim, girassol, canola e dendê), não se conhece, a priori, aquela(s) que

será(ão) afetada(s) pela mudança na demanda para produção de biodiesel.

- d) A tendência do mercado é crescente ou decrescente? A tendência do mercado de oleaginosas é crescente (FAO, 2006; AMARAL, 2010).
- e) Dentre as alternativas estudadas, há restrições? As restrições são estudadas nas Tabelas 2 a 5. Essa análise baseia-se no potencial aumento da produção de óleo para cada alternativa de matéria-prima e, para isso, considera: a disponibilidade de terras, a produtividade, a restrição decorrente do co-produto determinante do processo multifuncional de cada alternativa e, ainda, o atendimento da demanda da principal aplicação dos seis óleos vegetais, que é o setor alimentício. Da análise de restrições conclui-se que apenas o óleo de dendê e o óleo de girassol têm potencial para serem considerados marginais.
- f) Dentre as alternativas que não apresentam restrições, será afetada a alternativa mais competitiva ou a menos competitiva? E qual é a alternativa marginal? Sendo o horizonte temporal de longo-prazo e o mercado crescente, então a alternativa mais competitiva será afetada (conforme procedimento resumido pelo Quadro 4, na seção 3.2.5). Dessa análise, apresentada na Tabela 5, conclui-se que, das duas alternativas possíveis (óleo de dendê e óleo de girassol), o óleo de dendê é a alternativa marginal por ser a mais competitiva (menor custo).

Nas páginas seguintes serão apresentadas as Tabelas 2 a 5. A Tabela 2 mostra a situação da produção agrícola e da produção de óleo vegetal no Brasil em 2010 para cada uma das seis alternativas selecionadas. A Tabela 3 estima as áreas aptas, por região do país, para expansão agrícola de cada uma das matérias-primas estudadas. A Tabela 4 calcula o máximo incremento possível da produção de óleo vegetal proveniente de cada cultura no ano de 2030 em relação a 2010, considerando a disponibilidade de novas áreas agrícolas e os ganhos de produtividade. A Tabela 5 finaliza a delimitação do sistema; a matéria-prima marginal é determinada em função do incremento potencial de produção de cada óleo vegetal, das limitações impostas pelo co-produto determinante dos processos multifuncionais e pelo atendimento prioritário da aplicação principal dos seis

diferentes óleos vegetais, que é o setor alimentício (conforme informações apresentadas acerca de cada matéria-prima nas Figuras 14 a 19).

Tabela 2 – Produção de oleaginosas, óleos vegetais e aplicações, em 2010

SAFRA 2009/2010	soja (em grãos)	amendoim (em casca)	algodão (em pluma)	dendê (em cachos)	girassol (em grãos)	canola (em grãos)
(a) área agrícola (mil ha)	23.239,0	84,4	833,7	75,0	67,6	31,0(2)
NORTE	558,7	3,0	3,7	73,5	0,0	0,0
NORDESTE	1.758,0	10,0	295,0	1,5(1)	2,5	0,0
CENTRO-OESTE	10.410,7	0,7	514,5	0,0	48,8	0,0
SUDESTE	1.591,2	62,3	20,3	0,0	0,0	0,0
SUL	8.920,4	8,4	0,2	0,0	16,3	31,0(3)
(b) produtividade agrícola média (kg/ha)	2.920,0	2.752,0	3.920,0	10.000,0	1.383,0	1.361,0(2)
(c) produção agrícola (mil ton)	67.860,0	232,2	3.268,0	750,0	93,6	42,2(2)
(d) saldo balança comercial do produto in natura (mil ton)	28.150,0	53,0(4)	490,0(4)	0,0	-1,3	0,0(6)
(e) = (c-d) produto in natura disponível para o mercado interno (mil ton)	39.710,0	179,2	2.778,0	750,0	94,9	42,2
(f) produção nacional de óleo (mil ton)	6.040,0	59,1(5)	359,5(5)	165,0	40,8(5)	16,9
(g) saldo balança comercial óleo (mil ton)	1.220,0	31,0(4)	4,8(4)	-103,7	-21,6	0,0(6)
(h) = (f-g) óleo disponível no mercado interno (mil ton)	4.820,0	28,1	354,7	268,7	62,4	16,9
(i) óleo utilizado para biodiesel (m3)	1.983.071,1(7)	2.431,1(7)	58.347,1(7)	8.022,7(7)	486,2(7)	0,0(7)
(j) densidade do óleo (kg/m3)	913,8(8)	902,6(8)	914,8(8)	918,0(8)	916,1(8)	911,5(8)
(k) óleo utilizado para biodiesel (mil ton)	1.812,1	2,2	53,4	7,4	0,4	0,0
(l) = (h-k) demanda de óleo pela indústria alimentícia nacional (mil ton)	3.007,9	25,9	301,3	261,3	62,0	16,9

Fonte: O autor (2011)

NOTAS:

(1) Castro, Lima e Silva (2010); (2) Conab (2011); (3) Segundo Tomm *et al.* (2009) a produção de canola se concentra na região sul; (4) Conab (2010); (5) Calculado com base na produtividade de óleo: girassol 43%; algodão 11%; canola 40%; amendoim 33% (Figuras 14 a 19); (6) Não foram encontrados dados acerca de importação/exportação de canola e óleo de canola; (7) ANP (2011); (8) Karmakar, Karmakar e Mukherjee (2010); (9) Dados sem indicação de fonte foram extraídos de MAPA (2011); (10) O saldo da balança comercial é igual à subtração entre exportações e importações.

A Tabela 2 apresenta dados relativos a quatro importantes tópicos: área agrícola ocupada por cada cultura, por região do país, a produção agrícola por cultura, a produção de óleo vegetal proveniente de cada matéria-prima e o destino dado ao óleo vegetal (exportação, setor alimentício ou fabricação de biodiesel).

A área plantada com soja é aproximadamente 21 vezes superior à área somada das demais oleaginosas, o que demonstra a predominância dessa cultura. Mais de 80% da área está localizada nas regiões Centro-Oeste e Sul.

Com relação à produção agrícola, percebe-se que a produção de soja é aproximadamente 15 vezes superior à produção das demais culturas somadas (amendoim, algodão, dendê, girassol e canola). Outro dado interessante é que cerca de 40% da produção de soja in natura destina-se a exportação.

Com relação à produção de óleo vegetal, a produção de óleo de soja é quase 10 vezes superior à produção de óleo proveniente das demais culturas e cerca de 20% do óleo de soja é exportado.

Por fim, a Tabela 2 tem a importante finalidade de mostrar a quantidade de óleo, disponível no mercado interno, destinada para biodiesel e para outras aplicações. Sendo a indústria alimentícia o principal destino dos óleos vegetais (como mostrado nas Figuras 14 a 19), a tabela deduz que todo montante não usado para biodiesel foi usado como alimento. Como são conhecidos os valores de óleo disponível no mercado interno e a quantidade usada para produção de biodiesel, pode-se supor que o montante utilizado como alimento é a diferença entre esses valores. Essa estimativa é importante neste estudo, pois a aplicação como alimento será considerada prioritária e, portanto, na sequência do estudo, atua como restrição à aplicação de óleo vegetal para produção de biodiesel.

Tabela 3 – Área potencial para expansão agrícola

Área potencial por cultura e por estado (mil ha)	soja	amendoim	algodão	dendê	girassol	canola	preço médio de terras agrícolas (R\$/ha)
NORTE	14.886,0	0,0	0,0	22.010,8(1)	14.886,0	0,0(3)	
Pará	Inapto	Inapto	Inapto	12.275,2(1)	Inapto	inapto(3)	
Tocantins	14.886,0	Inapto	Inapto	Inapto	14.886,0	inapto(3)	
Rondônia	Inapto	Inapto	Inapto	5.663,5(1)	Inapto	inapto(3)	
Amazonas	Inapto	Inapto	Inapto	2.213,6(1)	Inapto	inapto(3)	1.349,6(4)
Acre	Inapto	Inapto	Inapto	1.310,2(1)	Inapto	inapto(3)	
Amapá	Inapto	Inapto	Inapto	144,1(1)	Inapto	inapto(3)	
Roraima	Inapto	Inapto	Inapto	404,2(1)	Inapto	inapto(3)	
NORDESTE	12.652,4	0,0	19.551,8	850,0 (2)	12.652,4	0,0(3)	
Maranhão	6.938,0	Inapto	6.938,0	Inapto	6.938,0	inapto(3)	
Piauí	5.714,4	Inapto	5.714,4	Inapto	5.714,4	inapto(3)	
Bahia	Inapto	Inapto	6.899,4	850,0(2)	Inapto	inapto(3)	
Ceará	Inapto	Inapto	0,0	Inapto	Inapto	inapto(3)	1.552,7(4)
Sergipe	Inapto	Inapto	0,0	Inapto	Inapto	inapto(3)	
Alagoas	Inapto	Inapto	0,0	Inapto	Inapto	inapto(3)	
Pernambuco	Inapto	Inapto	0,0	Inapto	Inapto	inapto(3)	
Paraíba	Inapto	Inapto	0,0	Inapto	Inapto	inapto(3)	
Rio Grande do Norte	Inapto	Inapto	0,0	Inapto	Inapto	inapto(3)	
CENTRO-OESTE	28.018,2	0,0	28.018,2	6.921,9(1)	28.018,2	0,0(3)	
Mato Grosso	9.314,3	Inapto	9.314,3	6.921,9(1)	9.314,3	inapto(3)	
Mato Grosso do Sul	5.189,7	Inapto	5.189,7	Inapto	5.189,7	inapto(3)	4.263,7(4)
Goiás	13.342,8	Inapto	13.342,8	Inapto	13.342,8	inapto(3)	
Distrito Federal	171,4	Inapto	171,4	inapto	171,4	inapto(3)	
SUDESTE	7.339,5	1.048,0	7.339,5	0,0	1.048,0	0,0(3)	
São Paulo	1.048,0	1.048,0	1.048,0	inapto	1.048,0	inapto(3)	
Minas Gerais	6.291,5	inapto	6.291,5	inapto	inapto	inapto(3)	5.860,6(4)
Rio de Janeiro	Inapto	inapto	inapto	inapto	inapto	inapto(3)	
Espírito Santo	Inapto	inapto	inapto	inapto	inapto	inapto(3)	
SUL	976,5	0,0	928,6	0,0	963,8	976,6	
Paraná	928,6	inapto	928,6	inapto	928,6	928,6	
Santa Catarina	12,8	inapto	inapto	inapto	inapto	12,8	8.453,2(4)
Rio Grande do Sul	35,2	inapto	inapto	inapto	35,2	35,2	
área potencial total para expansão agrícola (mil ha)	63.872,6	1.048,0	55.838,1	29.782,7	57.568,4	976,6	

Fonte: O autor (2011)

NOTAS:

(1) Ramalho Filho e Motta (2010); (2) Conab (2006); (3) Segundo Tomm *et al.* (2009) a produção de canola se concentra na região sul; (4) Preço de venda de terras para lavoura no ano de 2006, apresentados por Gasques, Bastos e Valdes (2008); (5) Números de disponibilidade de área agrícola, sem indicação de fonte, foram consultados em WWF (2009). (6) A aptidão/inaptidão das culturas nas diversas regiões e estados do Brasil foram extraídas de Meireles³⁰ (2003, *apud* Sebrae [200?]) e MAPA³¹ ([200?] *apud* Sebrae [200?]), exceto para o caso da canola.

³⁰ MEIRELLES, F. S. 2003 (referência incompleta no documento consultado).

³¹ BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Zoneamento agrícola de risco climático**. Brasília, [200?]. (referência incompleta no documento consultado).

A Tabela 3 mostra uma estimativa de áreas aptas para expansão do plantio das seis matérias-primas selecionadas para o presente estudo. Foi realizado um cruzamento de dados acerca das regiões aptas para plantio de cada cultura com informações das áreas potenciais para agricultura. A estimativa de áreas potenciais, consultada em WWF (2009), exclui áreas de reserva legal e de preservação permanente e inclui terrenos potencialmente agrícolas no cerrado e pastagens degradadas em todo país. Vale salientar que as áreas potenciais mostradas para cada cultura partem da premissa que as demais culturas não sofram alteração (*ceteris paribus*), tendo em vista que há áreas potenciais coincidentes para diversas culturas em análise.

É possível observar que as áreas potenciais estão localizadas predominantemente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. As culturas com maiores possibilidades de expansão territorial são, nessa ordem: soja, girassol, algodão e o dendê. A soja e o girassol apresentam boa distribuição por todo território, seguidos pelo algodão. O dendê se concentra na região Norte do país, mas ainda assim apresenta boa possibilidade de expansão. Por outro lado, o amendoim e a canola apresentam baixo potencial de áreas agricultáveis.

Além dos dados sobre disponibilidade de terras e aptidão das culturas de acordo com a região do Brasil, a Tabela 3 apresenta os preços médios do hectare de terra por região. As terras mais caras estão na região Sul, onde o hectare de terra custa cerca de 6 vezes mais do que na região Norte – região onde o preço médio por hectare é o mais baixo do país.

Tabela 4 – Incremento potencial na quantidade de óleo vegetal disponível para biodiesel em 2030

Incremento potencial de produção de óleo vegetal em 2030	soja (em grãos)	amendoim (em casca)	algodão (em pluma)	dendê (em cachos)	girassol (em grãos)	canola (em grãos)
(a) previsão para produtividade agrícola em 2030 (kg/ha)	2.998,0(2)	2.752,0(4)	4.953,0(2)	25.000,0(3)	2.100,0(3)	4.500,0(1)
(b) produtividade agrícola em 2010 (Y), em (kg/ha)	2.920,0(7)	2.752,0(7)	3.920,0(7)	10.000,0(7)	1.383,0(7)	1.361,0(7)
(c) = (a-b) Mudança na produtividade (ΔY), em (kg/ha)	78,0	0,0	1.033,0	15.000,0	717,0	3.139,0
(d) área agrícola ocupada em 2010 (A), em (mil ha)	23.239,0(8)	84,4(8)	833,7(8)	75,0(8)	67,6(8)	31,0(8)
(e) mudança potencial na área agrícola (ΔA), em (mil ha)	63.872,7(9)	1.048,0(9)	55.838,1(9)	29.782,7(9)	57.568,4(9)	976,6(9)
(f) = (b*e) incremento da produção, decorrente de novas áreas ($Y*\Delta A$), em (mil ton)	186.508,3	2.884,1	218.885,4	297.827,0	79.617,1	1.329,2
(g) = (c*(d+e)) incremento da produção, decorrente do aumento da produtividade ($\Delta Y*(A+\Delta A)$), em (mil ton)	6.794,7	0,0	58.542,0	447.865,5	41.325,0	3.162,9
(h) = (f+g) incremento total da produção 2010-2030 $\Delta Q=(Y*\Delta A)+(\Delta Y*(A+\Delta A))$, em (mil ton)	193.303,0	2.884,1	277.427,3	745.692,5	120.942,1	4.492,0
(i) estimativa do incremento na exportação do produto in natura (mil ton)	13.678,2(10)	25,8(10)	238,1(10)	0,0	-0,6	0,0
(j) = (h-i) incremento da disponibilidade interna do produto in natura (mil ton)	179.624,8	2.858,3	277.189,2	745.692,5	120.942,7	4.492,0
(k) % óleo	20%	33%	11%	19%	43%	40%
(l) = (j*k) incremento da produção de óleo (mil ton)	35.925,0	943,3	30.490,8	141.681,6	52.005,4	1.796,8
(m) estimativa do incremento na exportação de óleo (mil ton)	592,8(10)	15,1(10)	2,3(10)	-50,4	-10,5	0,0
(n) = (l-m) incremento da disponibilidade interna de óleo vegetal (mil ton) (5)	35.332,2	928,2	30.488,5	141.732,0	52.015,9	1.796,8
(o) estimativa de incremento na demanda interna de óleo para alimento (mil ton)	1.310,6(6)	11,3(6)	131,3(6)	113,9(6)	27,0(6)	7,4(6)
(p) = (n-o) incremento potencial da quantidade de óleo para biodiesel em 2030 (mil ton)	34.021,6	916,6	30.357,2	141.618,1	51.988,9	1.789,4

Fonte: O autor (2011)

NOTAS: (1) potencial das variedades de canola usadas no Canadá (TOMM *et al.*, 2009); (2) Santana *et al.* (2011); (3) Castro, Lima e Silva (2010); (4) adotada mesma produtividade atual, pois não foi encontrado nenhum dado que pudesse ser usado como previsão para 2030; (5) Os óleos vegetais apresentam características físico-químicas e nutricionais diferentes. Do ponto de vista alimentício, são de especial interesse o teor dos diferentes tipos de ácidos graxos (gorduras saturadas, monoinsaturadas e poliinsaturadas), odor, sabor e vitaminas (ÓLEOS especiais: gordura e saúde³², 1997, *apud* FREITAS; FERREIRA; TSUNECHIRO, 1998). Em função das diferentes características, os óleos vegetais podem ser subdivididos em nichos de mercado. Apesar disso, os óleos vegetais podem ser considerados substituíveis entre si, pertencendo ao mesmo mercado (AMARAL, 2010; BARBOSA, 2011); (6) Está sendo considerada a taxa anual de crescimento do consumo alimentício de óleo vegetal, nos países da América Latina e Caribe, de 2,2% no período 2010-2015 e de 1,7% entre 2015-2030 (FAO, 2003); (7) Valores de produtividade reais, alcançados em 2010, mostrados na Tabela 2; (8) Área ocupada por cada cultura em 2010, mostrada na Tabela 2; (9) Área potencial para expansão agrícola, mostrada na Tabela 3; (10) Está sendo considerada a taxa anual de crescimento mundial do uso alimentício de óleos vegetais, oleaginosas e seus produtos, de 2,3% no período 2010-2015 e de 1,9% entre 2015-2030 (FAO, 2003);

³² ÓLEOS especiais: gordura e saúde. **Revista Cargill**, São Paulo, v. 16, n. 96, p. 16-20, jul./set. 1997.

A Tabela 4 estima o incremento potencial na quantidade de óleo vegetal disponível para a produção de biodiesel no ano de 2030, em relação a 2010, a partir de cada uma das matérias-primas. O incremento deve ser visto isoladamente para cada matéria-prima (*ceteris paribus*), pois, como analisado na Tabela anterior, há áreas agrícolas potenciais que são coincidentes para diversas culturas.

Primeiramente, a Tabela 4 realiza o cálculo do incremento potencial da produção agrícola, levando em conta o acréscimo de área e o aumento da produtividade. Isso é mostrado nas linhas de (a) até (h) e é realizado conforme a equação (1), já apresentada na seção 3.4. A partir daí, são descontadas quantidades destinadas à indústria alimentícia, considerada aplicação prioritária, até chegar ao resultado final. Na linha (i) é feita uma estimativa do incremento nas exportações do produto in natura no período 2010-2030 e parte-se da premissa que o uso final é alimentício. Na linha (l) é feito o cálculo da quantidade de óleo vegetal resultante do processamento da matéria-prima que permanece no mercado interno, levando-se em conta que todo montante é processado. Por fim, é descontada a parcela relativa ao incremento da exportação de óleo e a parcela relativa ao incremento da demanda pela indústria alimentícia no mercado interno, ambas calculadas com base numa projeção de crescimento de consumo no período 2010-2030.

Percebe-se um potencial muito grande para o óleo de dendê, mas inexplorado até o ano de 2010, tendo em vista a irrisória área plantada até aquele ano. Em seguida aparecem o girassol, a soja e o algodão, com aproximadamente 35%, 23% e 20% do potencial do óleo de dendê, respectivamente. O potencial do amendoim e da canola são muito pequenos.

Tabela 5 – Delimitação do sistema

Delimitação do sistema	óleo de soja	óleo de amendoim	óleo de algodão	óleo de dendê	óleo de girassol	óleo de canola
(a) o óleo é o co-produto determinante do processo multifuncional?	NÃO(10)	NÃO(10)	NÃO(10)	SIM(10)	SIM(10)	SIM(10)
linhas (b), (c), (d), (e), (f): apenas para os casos em que o óleo NÃO é co-produto determinante						
(b) produção em 2010 do co-produto determinante (mil ton)	30.179,6 (farelo) (1)	90 ,0 (farelo) (2)	1.190,0 (fibra) (3)	-	-	-
(c) previsão de produção do co-produto determinante em 2030 (mil ton)?	46.637,1 (farelo) (4)	139,1 (farelo) (4)	1.838,9 (fibra) (4)	-	-	-
(d) produção (dependente) de óleo prevista para 2030 (mil ton)	12.272,9 (6)	114,7 (6)	505,7 (6)	-	-	-
(e) produção (dependente) de óleo em 2010 (mil ton)	6.040,0 (5)	59,1 (5)	359,5 (5)	-	-	-
(f)=(d-e) incremento potencial de óleo, limitado pelo co-produto determinante (mil ton)	6.232,9	55,6	146,2	-	-	-
(g)=tab.4 (m+o) incremento do consumo na indústria alimentícia nacional e exportação (mil ton)	1.903,4(11)	26,3(11)	133,6(11)			
(h)=(f-g) incremento potencial de óleo, limitado pelo co-produto determinante, disponível para biodiesel (mil ton)	4.329,5	29,3	12,6			
(i)=tab.4(p) incremento potencial de óleo, limitado pela produtividade e pela área agrícola, disponível para biodiesel (mil ton)	34.021,6(7)	916,9(7)	30.357,2(7)	141.618,1(7)	51.988,9(7)	1.789,4(7)
(j)=(h ou i) qual a restrição prevalente (mil ton)?	4.329,5	29,3	12,6	141.618,1	51.988,9	1.789,4
(k) densidade do óleo (kg/m3)	913,8(8)	902,6(8)	914,8(8)	918,0(8)	916,1(8)	911,5(8)
(l)= (j/k) incremento potencial na produção de óleo vegetal 2010-2030, em (mi m ³)	4,7	0,03	0,03	154,3	56,8	2,0
(m) o incremento potencial na produção de óleo é maior que a unidade de análise? (fluxo de ref.=10,8 mi m ³)	NÃO	NÃO	NÃO	SIM (provável marginal)	SIM (provável marginal)	NÃO
(n) preço US\$/ton	848,0(9)	1291,0(9)	888,0(9)	793,0(9)	956,0(9)	927,0(9)
(o) óleo marginal para produção de biodiesel	-	-	-	Mais competitiva (marginal)	Menos competitiva	-
(p) óleo(s) substituto(s) do óleo marginal	Sendo o óleo de dendê o co-produto determinante do processo multifuncional, não há necessidade de substituição, visto que sua produção não é limitada por outro co-produto. Uma possível restrição seria a disponibilidade de área agrícola, que nesse caso também não é fator limitante.					

Fonte: O autor (2011)

NOTAS: (1) Calculado a partir da Tabela 2, linha (e), adotando a produtividade de farelo igual a 76% (Figura 14); (2) Calculado a partir de dados de Conab (2011); (3) Conab (2011); (4) A projeção para o ano 2030 considera uma taxa de crescimento de 2,2% a.a. para a produção de commodities agrícolas na América Latina e Caribe (FAO, 2006); (5) Tabela 2, linha (f); (6) Calculado considerando que a soja é 76% farelo e 20% óleo, o amendoim 40% farelo e 33% óleo, e o algodão é 40% fibra e 11% óleo (dados obtidos das Figuras 14, 15 e 19); (7) Tabela 4, linha (p); (8) Karmakar, Karmakar e Mukherjee (2010); (9) Preços de venda dos óleos vegetais no mercado internacional de *commodities*, safra 2009/10 (USDA, 2011); (10) Informação obtida das Figuras 14 a 19; (11) Soma das linhas (m) e (o) da Tabela 4 (incremento da exportação de óleo + incremento do consumo de óleo pela indústria alimentícia nacional).

A Tabela 5 apresenta a delimitação do sistema. Com a finalidade de encontrar o óleo vegetal marginal para produção de biodiesel, são analisadas as restrições relativas ao processo multifuncional, à aplicação prioritária (indústria alimentícia), ao incremento potencial de produção proveniente de novas áreas e aumento de produtividade, e a competitividade econômica.

Primeiramente são identificados os óleos vegetais considerados co-produtos dependentes em seus processos multifuncionais. Uma análise específica foi feita para esses casos, visto que, para eles, o volume de produção de óleo é limitado pela produção do co-produto determinante. A partir de uma estimativa para o incremento de produção do co-produto determinante (farelo de soja, farelo de amendoim e fibra de algodão), foi determinada a estimativa de incremento de produção de óleo (linha f). Desses valores, deve ser descontado o montante para atender a aplicação prioritária (indústria alimentícia, nacional e exportação), obtendo-se a quantidade disponível para biodiesel.

A restrição dominante é a situação que oferece a menor quantidade de óleo: limitação devido ao processo multifuncional (linha h) ou a limitação devido ao incremento possível de produção proveniente de novas áreas e maior produtividade (linha i). Para os óleos de dendê, girassol e canola, a única limitação é proveniente da disponibilidade de novas áreas e incremento de produtividade, já que são co-produtos determinantes.

Obtidos os incrementos potenciais de produção de óleo vegetal para cada matéria-prima, esses valores são comparados com a unidade de análise. Apenas as alternativas que superam a unidade de análise têm potencial para serem marginais: óleo de dendê e óleo de girassol. Por fim, a alternativa marginal é a mais competitiva dentre aquelas que apresentam potencial: óleo de dendê.

É importante salientar que não há necessidade de identificar o produto marginal substituto do montante de óleo de dendê que seria aplicado na produção de biodiesel. Haveria necessidade dessa análise, caso o produto marginal fosse um co-produto dependente, pois o co-produto dependente não teria sua produção aumentada, acarretando em um desvio de determinada quantidade de óleo de outra aplicação. Essa outra aplicação teria que ser atendida por um óleo substituto no mercado.

4.3 INVENTÁRIO DO USO DO SOLO

Na seção anterior foi determinado o óleo vegetal marginal para atender ao incremento na produção de biodiesel em 2030: óleo de dendê. A seguir, na Tabela 6, é feita uma estimativa da área afetada para plantio do dendê, assim como da sua localização. Além disso, é realizada uma análise dos efeitos indiretos no uso do solo provocados pelos co-produtos do dendê. Por fim, é apresentado o inventário final do uso do solo, que é o resultado da subtração entre a nova área a ser ocupada pelo dendê e a área economizada em razão da substituição de produtos no mercado por co-produtos dependentes resultantes do processo multifuncional do dendê.

Vale ressaltar que não há deslocamento de outra atividade porque as áreas para expansão agrícola que estão sendo consideradas neste estudo foram obtidas a partir de um levantamento (WWF, 2009) de áreas sem uso e aptas para a agricultura. Trata-se de áreas agricultáveis no Cerrado e pastagens degradadas em todo o país.

Tabela 6 – Resultado do inventário do uso do solo

co-produto determinante	aplicação	uso do solo?	quantidade	produção agrícola necessária (mi ton)	qual a área agrícola adicional necessária (mil ha)?	onde ocorrerá incremento de área (área marginal)?
óleo de dendê	biodiesel	sim	10,8 mi m ³ (unidade de análise) = 9,9 mi ton (3)	54,2(4)	2.123,0(6)	Região Norte(8)
co-produtos dependentes	aplicação (produtos substituídos)	o produto substituído ocupa área agrícola?	quantidade produzida do co-produto dependente (mi ton)	quantidade equivalente do produto substituído (mi ton)	qual a área agrícola evitada (mil ha)?	qual a localização da área agrícola evitada (área marginal)?
engaços	fertilizante	não	-	-	-	-
efluente líquido	fertilizante	não	-	-	-	-
óleo de palmiste	substituto dos óleos de côco e babaçu na indústria alimentícia (1)	sim	0,6(5)	Não ocorre redução na produção do produto substituído(1)	Não há área agrícola evitada(1)	-
torta da amêndoa	substituto do farelo de soja como ração (2)	sim	1,5(4)	1,5(4)	633,7(7)	Região Norte(9)
Cascas	energia	não	-	-	-	-
torta da polpa	energia	não	-	-	-	-
cinzas da queima da polpa	fertilizante e correção da acidez do solo	não	-	-	-	-
RESULTADO DO INVENTÁRIO DO USO DO SOLO	incremento de área – área evitada = 2.123 mil ha – 633,7 mil ha = 1.489,3 mil ha (incremento de área na Região Norte do Brasil)					

Fonte: O autor (2011)

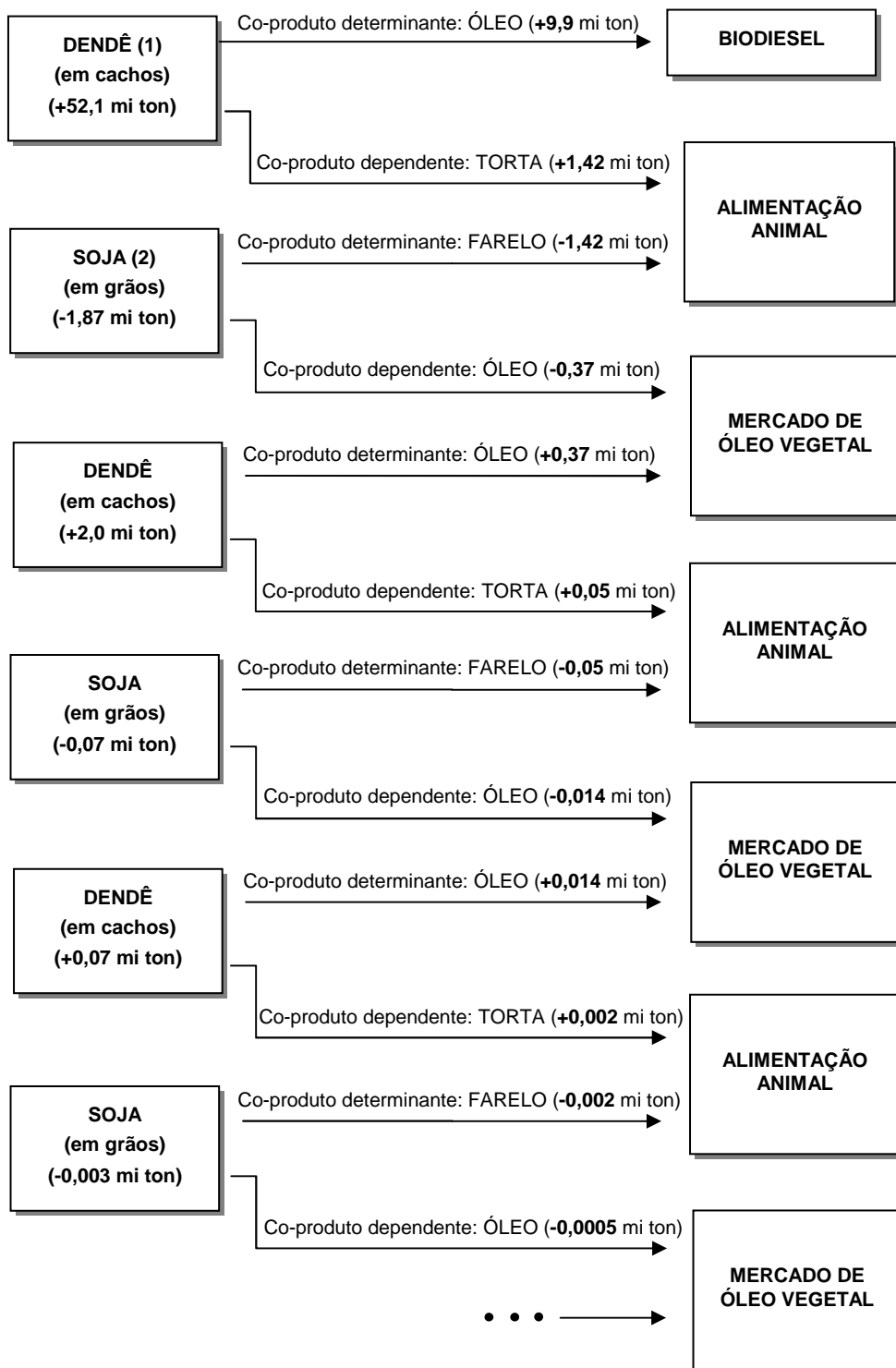
NOTAS: (1) O mercado do óleo de palmiste vem ganhando espaço no Brasil devido à crise que vem atravessando o óleo de babaçu (MDA, 2007). Por isso, nesse trabalho, o óleo de palmiste está sendo considerado substituto do óleo de babaçu (produto marginal a ser substituído). O baixo conteúdo de óleo no fruto do babaçu direciona seu uso, principalmente, para co-geração de energia por meio da queima da polpa (co-produto determinante), de alta densidade, capaz de substituir o carvão vegetal (GARAGORRY *et al.*, 2010). Desse modo, o óleo de babaçu é um co-produto dependente e sua produção não será afetada pela maior oferta de óleo de palmiste; (2) A torta de amêndoa do dendê pode ser utilizada em misturas para alimentação animal. Ela pode substituir parcialmente o farelo de trigo na alimentação de ruminantes (MÜLLER; FURLAN JÚNIOR; CELESTINO FILHO, 2006). Substitui também parcialmente o milho e o farelo de soja na alimentação de cabras em lactação, e o farelo de soja na alimentação de ovinos (ABDALLA *et al.*, 2008). Nesse trabalho, com objetivo de simplificação, a torta de amêndoa está sendo considerada substituta do farelo de soja e equivalente do

ponto de vista nutricional; (3) A densidade do óleo de dendê é 918,0 kg/m³ (Tabela 5); (4) Estimativa obtida da análise feita a partir da Figura 20; (5) O óleo de palmiste representa 1,2% do dendê em cachos (Figura 18); (6) Calculado pela Equação(1), $\Delta Q = Y \cdot \Delta A + \Delta Y \cdot (A + \Delta A)$, onde ΔA é a incógnita, $\Delta Q = 54,2$ mi ton e demais dados obtidos na Tabela 4: $Y = 10$ ton/ha, $\Delta Y = 15$ ton/ha e $A = 75$ mil ha; (7) A quantidade de soja que deixará de ser produzida é de 1,9 mi (valor obtido da Figura 20). Considerando a produtividade da soja, em 2030, igual a 2.998 kg/ha (Tabela 4, linha a), encontra-se a área evitada, que é de 633,7 mil ha; (8) Como o mercado de oleaginosas é crescente, então a região afetada é a mais competitiva (nesse caso a região Norte, onde o custo das terras agrícolas é o menor do país, conf. dados apresentado na Tabela 3); (9) Como o mercado de farelo de soja é crescente (FAO, 2006), a região afetada é a mais competitiva, que nesse caso é a região Norte. Em outras palavras, deixarão de ser plantados 633,7 mil ha de soja na região Norte;

A Tabela 6 apresenta o inventário do uso do solo para atender ao aumento na demanda de óleo vegetal para produção de biodiesel. Primeiramente, são relacionados o co-produto determinante, os co-produtos dependentes, e a principal aplicação de cada um dos co-produtos do dendê. Nesse caso, a aplicação do co-produto determinante é a produção de biodiesel.

Em seguida, é feita uma análise de quais co-produtos do dendê podem afetar o uso do solo. Conclui-se que apenas o óleo de palmiste e a torta de amêndoa tem esse potencial porque são substitutos de produtos que utilizam solo agrícola nos seus processos produtivos. O primeiro pode substituir o óleo de babaçu na indústria alimentícia, mas, mesmo que isso ocorra, não há redução na produção de babaçu, pois o co-produto determinante do babaçu é a polpa (GARAGORRY *et al.*, 2010). Desse modo, o óleo de palmiste não consegue evitar o uso de área agrícola. O segundo produto com potencial para substituição, a torta de amêndoa, substitui o farelo de soja usado como ração animal. Nesse caso há redução de área agrícola, pois o farelo de soja é co-produto determinante do processo multifuncional da soja e, sendo substituído, leva a uma queda na produção da soja.

Estimam-se, então, as áreas agrícolas que são afetadas em decorrência do aumento da produção de óleo de dendê. Partindo da quantidade de óleo necessária (unidade de análise=9,9 mi ton) e levando em conta a substituição do farelo de soja pela torta de amêndoa do dendê, a Figura 20 apresenta a cadeia de causa e efeito desse incremento de produção.



(1) O óleo de dendê e a torta de amêndoa representam 19% e 2,7% da massa do dendê em cachos, respectivamente (Figura 18).

(2) O óleo de soja e o farelo representam 20% e 76% da massa da soja em grãos, respectivamente (Figura 14).

Figura 20 – Estimativa da quantidade de dendê e substituições no mercado

Fonte: o autor (2013)

É possível observar, na Figura 20, que é criado um ciclo repetitivo (*loop*) de substituições. O sinal positivo diante das quantidades indica incremento e o sinal negativo indica redução. A torta da amêndoa do dendê substitui o farelo de soja usado como ração animal; sendo o farelo de soja o co-produto determinante do processo multifuncional da soja, haverá queda na produção de soja e, conseqüentemente, na produção de óleo de soja. A quantidade de óleo de soja que deixa de ser produzida necessita de um substituto no mercado de óleos vegetais. Como o óleo vegetal marginal é o óleo de dendê, ele próprio irá suprir essa necessidade. O ciclo de substituições se repete como descrito anteriormente. Percebe-se que a quantidade de produtos afetada é decrescente a cada ciclo. Em razão disso, este trabalho está levando em conta a substituição até o 3º ciclo, desprezando os ciclos seguintes, pois os valores tornam-se bastante reduzidos.

A quantidade a ser incrementada na produção de dendê em cachos é a soma dos três ciclos considerados: $52,1+2,0+0,07=54,17\approx 54,2$ mi ton. A quantidade reduzida na produção de soja em grãos também é a somatória dos ciclos considerados: $1,87+0,07+0,003=1,943\approx 1,9$ mi ton. A quantidade de farelo substituído pela torta de amêndoa pode ser encontrado fazendo: $1,42+0,05+0,002=1,472\approx 1,5$ mi ton.

Tendo sido calculada a produção agrícola requerida e a produção agrícola evitada, por fim, calcula-se a área agrícola adicional e a área evitada. A área agrícola adicional é calculada por meio da equação (1), apresentada na seção 3.4, e é igual a 2,12 milhões de hectares. A localização é determinada considerando a região agrícola marginal. Como o mercado é crescente, a área agrícola marginal é a mais competitiva, que nesse caso é a Região Norte, com menor custo do hectare de terra (como pode ser observado na Tabela 3). O cálculo da área agrícola evitada mostra que 633,7 mil hectares deixariam de ser plantados com soja e, da mesma forma que no caso do dendê, a localização mais competitiva no mercado de terras é afetada: a região Norte.

O resultado final do inventário é a diferença entre o incremento de área para plantio de dendê, visando a produção do óleo vegetal, e a área que deixa de ser plantada com soja em função da substituição do farelo de soja pela torta de amêndoa. Esses valores podem ser subtraídos porque se encontram na mesma região. Conclui-se, então, que haverá um incremento líquido de uso agrícola do solo de aproximadamente 1,5 milhões de hectares na região Norte do Brasil.

4.4 CENÁRIOS ALTERNATIVOS

O estudo apresentado anteriormente fornece um cenário base. Estudos prospectivos e que envolvem variáveis econômicas possuem elevada incerteza. Em função disso, a seguir são apresentados alguns cenários alternativos com objetivo de avaliar a sensibilidade do resultado do estudo com relação a algumas variáveis escolhidas aleatoriamente. Vale ressaltar, contudo, que muitas outras variáveis podem afetar os resultados, tais como preços, taxas de crescimento de produção e demanda, entre outros. Serão apresentados três cenários alternativos: a produtividade do dendê permanece inalterada, mudança no horizonte de tempo do estudo, e mudança na taxa de crescimento da produção do co-produto determinante.

4.4.1 Produtividade do dendê permanece inalterada

No cenário base, apresentado anteriormente, a produtividade do dendê tem grande potencial de crescimento, passando de 10.000 kg/ha em 2010 para 25.000 kg/ha em 2030. Este cenário alternativo, com objetivo de verificar as consequências para o resultado do estudo, adota a premissa de que nenhum incremento de produtividade ocorra para o dendê. A Tabela 7 apresenta a mesma análise feita na Tabela 4 adotando, porém, nenhum incremento de produtividade para o dendê. A partir da Tabela 7 percebe-se que o incremento potencial na quantidade de óleo de dendê disponível para biodiesel passaria a ser de 56,5 mi ton, em contraste com os 141,5 mi ton do cenário base. Sendo a densidade do óleo de dendê 918 kg/m³ (Tabela 5, linha k), a disponibilidade de óleo de dendê para biodiesel seria de 61,6 mi m³, quantidade suficiente para atender a unidade de análise, que é de 10,8 mi m³. Com isso, as conclusões do estudo não mudam em relação ao cenário base.

Tabela 7 – Incremento potencial na quantidade de óleo vegetal disponível para biodiesel em 2030 com a produtividade do dendê inalterada

Incremento potencial de produção de óleo vegetal em 2030	soja (em grãos)	amendoim (em casca)	algodão (em pluma)	dendê (em cachos)	girassol (em grãos)	canola (em grãos)
(a) previsão para produtividade agrícola em 2030 (kg/ha)	2.998,0	2.752,0	4.953,0	10.000,0	2.100,0	4.500,0
(b) produtividade agrícola em 2010 (Y), em (kg/ha)	2.920,0	2.752,0	3.920,0	10.000,0	1.383,0	1.361,0
(c) = (a-b) Mudança na produtividade (ΔY), em (kg/ha)	78,0	0,0	1.033,0	0,0	717,0	3.139,0
(d) área agrícola ocupada em 2010 (A), em (mil ha)	23.239,0	84,4	833,7	75,0	67,6	31,0
(e) mudança potencial na área agrícola (ΔA), em (mil ha)	63.872,7	1.048,0	55.838,1	29.782,7	57.568,4	976,6
(f) = (b*e) incremento da produção, decorrente de novas áreas ($Y*\Delta A$), em (mil ton)	186.508,3	2.884,1	218.885,4	297.827,0	79.617,1	1.329,2
(g) = (c*(d+e)) incremento da produção, decorrente do aumento da produtividade ($\Delta Y*(A+\Delta A)$), em (mil ton)	6.794,7	0,0	58.542,0	0,0	41.325,0	3.162,9
(h) = (f+g) incremento total da produção 2010-2030 $\Delta Q=(Y*\Delta A)+(\Delta Y*(A+\Delta A))$, em (mil ton)	193.303,0	2.884,1	277.427,3	297.827,0	120.942,1	4.492,0
(i) estimativa do incremento na exportação do produto in natura (mil ton)	13.678,2	25,8	238,1	0,0	-0,6	0,0
(j) = (h-i) incremento da disponibilidade interna do produto in natura (mil ton)	179.624,8	2.858,3	277.189,2	297.827,0	120.942,7	4.492,0
(k) % oleo	20%	33%	11%	19%	43%	40%
(l) = (j*k) incremento da produção de óleo (mil ton)	35.925,0	943,3	30.490,8	56.587,1	52.005,4	1.796,8
(m) estimativa do incremento na exportação de óleo (mil ton)	592,8	15,1	2,3	-50,4	-10,5	0,0
(n) = (l-m) incremento da disponibilidade interna de óleo vegetal (mil ton) (ver nota 5)	35.332,2	928,2	30.488,5	56.637,5	52.015,9	1.796,8
(o) estimativa de incremento na demanda interna de óleo para alimento (mil ton)	1.310,6	11,3	131,3	113,9	27,0	7,4
(p) = (n-o) incremento potencial da quantidade de óleo para biodiesel em 2030 (mil ton)	34.021,6	916,9	30.357,2	56.523,7	51.988,9	1.789,4

Fonte: O autor (2013)

4.4.2 Mudança no horizonte de tempo do estudo

O objetivo deste cenário é verificar alterações nos resultados do estudo em função da mudança do horizonte de tempo. Foi adotado o período 2010-2020. A Tabela 8 apresenta a mesma análise realizada na Tabela 4, mas com horizonte temporal 2010-2020. Na linha (c), levando em conta que o aumento da produtividade ocorre, sobretudo, pelo desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos, está sendo considerado um aumento de produtividade de 50% em relação ao incremento do estudo 2010-2030. Foi arbitrado este valor tendo em vista que o período que está sendo considerado é metade do período considerado no cenário base. Nas linhas (i), (m) e (o), as estimativas de crescimento adotam as taxas já mencionadas na Tabela 4, mas para um período de 10 anos; o mesmo ocorre na linha (c) da Tabela 9 (a Tabela 9 realiza a mesma análise feita na Tabela 5). A unidade de análise adotada na Tabela 9 é 50% do valor considerado no estudo 2010-2030, pois neste cenário temos metade do período.

Pode-se observar que não há mudança na conclusão em relação ao cenário base. O óleo de soja, como co-produto dependente, tem sua produção limitada pelo farelo, que por sua vez apresenta um incremento menor do que no cenário base em razão do horizonte de tempo mais curto. Os óleos de dendê e girassol apresentam redução na disponibilidade para biodiesel devido exclusivamente ao menor incremento na produtividade, mas mesmo assim atendem a unidade de análise.

Tabela 8 – Incremento potencial na quantidade de óleo vegetal disponível para biodiesel em 2020

Incremento potencial de produção de óleo vegetal em 2020	soja (em grãos)	amendoim (em casca)	algodão (em pluma)	dendê (em cachos)	girassol (em grãos)	canola (em grãos)
(a) previsão para produtividade agrícola em 2030 (kg/ha)	2.998,0	2.752,0	4.953,0	25.000,0	2.100,0	4.500,0
(b) produtividade agrícola em 2010 (Y), em (kg/ha)	2.920,0	2.752,0	3.920,0	10.000,0	1.383,0	1.361,0
(c) = ((a-b)*0,5) Mudança na produtividade (ΔY), em (kg/ha)_(50% até 2020)	39,0	0,0	516,5	7.500,0	358,5	1.569,5
(d) área agrícola ocupada em 2010 (A), em (mil ha)	23.239,0	84,4	833,7	75,0	67,6	31,0
(e) mudança potencial na área agrícola (ΔA), em (mil ha)	63.872,7	1.048,0	55.838,1	29.782,7	57.568,4	976,6
(f) = (b*e) incremento da produção, decorrente de novas áreas ($Y*\Delta A$), em (mil ton)	186.508,3	2.884,1	218.885,4	297.827,0	79.617,1	1.329,2
(g) = (c*(d+e)) incremento da produção, decorrente do aumento da produtividade ($\Delta Y*(A+\Delta A)$), em (mil ton)	3.397,4	0,0	29.271,0	223.932,8	20.662,5	1.581,4
(h) = (f+g) incremento total da produção 2010-2020 $\Delta Q=(Y*\Delta A)+(\Delta Y*(A+\Delta A))$, em (mil ton)	189.905,6	2.884,1	248.156,3	521.759,8	100.279,6	2.910,6
(i) estimativa do incremento na exportação do produto in natura (mil ton)	6.501,9	12,2	113,2	0,0	-0,3	0,0
(j) = (h-i) incremento da disponibilidade interna do produto in natura (mil ton)	183.403,7	2.871,9	248.043,2	521.759,8	100.279,9	2.910,6
(k) % óleo	20%	33%	11%	19%	43%	40%
(l) = (j*k) incremento da produção de óleo (mil ton)	36.680,7	947,7	27.284,7	99.134,4	43.120,4	1.164,2
(m) estimativa do incremento na exportação de óleo (mil ton)	281,8	7,2	1,1	-24,0	-5,0	0,0
(n) = (l-m) incremento da disponibilidade interna de óleo vegetal (mil ton) (ver nota 5)	36.399,0	940,6	27.283,6	99.158,3	43.125,3	1.164,2
(o) estimativa de incremento na demanda interna de óleo para alimento (mil ton)	640,7	5,5	64,2	55,7	13,2	3,6
(p) = (n-o) incremento potencial da quantidade de óleo para biodiesel em 2020 (mil ton)	35.758,3	935,0	27.219,5	99.102,6	43.112,1	1.160,6

Fonte: O autor (2013)

Tabela 9 – Delimitação do sistema com horizonte temporal 2010-2020

Delimitação do sistema	óleo de soja	óleo de amendoim	óleo de algodão	óleo de dendê	óleo de girassol	óleo de canola
(a) o óleo é o co-produto determinante do processo multifuncional?	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM
linhas (b), (c), (d), (e), (f): apenas para os casos em que o óleo NÃO é co-produto determinante						
(b) produção em 2010 do co-produto determinante (mil ton)	30.179,6 farelo	90,0 farelo	1.190,0 fibra			
(c) previsão de produção do co-produto determinante em 2020 (mil ton)?	37.516,5 farelo	111,9 farelo	1.479,3 fibra			
(d) produção (dependente) de óleo prevista para 2020 (mil ton)	9.872,8	92,3	406,8			
(e) produção (dependente) de óleo em 2010 (mil ton)	6.040,0	59,1	359,5			
(f)=(d-e) incremento potencial de óleo, limitado pelo co-produto determinante (mil ton)	3.832,8	33,2	47,3			
(g) incremento do consumo na indústria alimentícia nacional e exportação (mil ton)	922,5	12,7	65,3			
(h)=(f-g) incremento potencial de óleo, limitado pelo co-produto determinante, disponível para biodiesel (mil ton)	2.910,3	20,5	-18,0			
(i) incremento potencial de óleo, limitado pela produtividade e pela área agrícola, disponível para biodiesel (mil ton)	35.758,3	935,0	27.219,5	99.102,6	43.112,1	1.160,6
(j)=(h ou i) qual a restrição prevalente (mil ton)?	2.910,3	20,5	-18,0	99.102,6	43.112,1	1.160,6
(k) densidade do óleo (kg/m3)	913,8	902,6	914,8	918,0	916,1	911,5
(l)= (j/k) incremento potencial na produção de óleo vegetal 2010-2020, em (mi m ³)	3,2	0,0	0,0	108,0	47,1	1,3
(m) o incremento potencial na produção de óleo é maior que o unidade de análise? (fluxo de ref.=5,4 mi m3)	NÃO	NÃO	NÃO	SIM (provável marginal)	SIM (provável marginal)	NÃO
(n) preço US\$/ton	848	1291	888	793	956	927
(o) óleo marginal para produção de biodiesel	-	-	-	Mais competitiva (marginal)	Menos competitiva	-

Fonte: O autor (2013)

4.4.3 Mudança na taxa de crescimento da produção do co-produto determinante

O objetivo deste cenário é verificar alterações nos resultados do estudo em função da mudança na taxa de crescimento da produção do co-produto determinante. A Tabela 10 apresenta a mesma análise realizada na Tabela 5, porém, adota para a linha (c) uma taxa de crescimento para produção do co-produto determinante de 3,7% a.a. Essa taxa é apresentada pela FAO (2006) para a produção de óleos vegetais, oleaginosas e seus produtos, na América Latina e Caribe. No cenário base a taxa aplicada foi de 2,2% a.a., que conforme FAO (2006) é a taxa para crescimento da produção de commodities agrícolas na América Latina e Caribe.

Pode-se observar que não há mudança na conclusão em relação ao cenário base. Percebe-se, porém, que a disponibilidade de óleo de soja para biodiesel passa de 4,7 mi m³ para 9,3 mi m³, quase atingindo a unidade de análise.

Tabela 10 – Delimitação do sistema para diferente taxa de crescimento do co-produto determinante

Delimitação do sistema	óleo de soja	óleo de amendoim	óleo de algodão	óleo de dendê	óleo de girassol	óleo de canola
(a) o óleo é o co-produto determinante do processo multifuncional?	NÃO	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM
linhas (b), (c), (d), (e), (f): apenas para os casos em que o óleo NÃO é co-produto determinante						
(b) produção em 2010 do co-produto determinante (mil ton)	30.179,6	90,0	1.190,0			
	farelo	farelo	fibra			
(c) previsão de produção do co-produto determinante em 2030 (mil ton)?	62.414,9	186,1	2.461,1			
	farelo	farelo	fibra			
(d) produção (dependente) de óleo prevista para 2030 (mil ton)	16.425,0	153,6	676,8			
(e) produção (dependente) de óleo em 2010 (mil ton)	6.040,0	59,1	359,5			
(f)=(d-e) incremento potencial de óleo, limitado pelo co-produto determinante (mil ton)	10.385,0	94,5	317,3			
(g) incremento do consumo na indústria alimentícia nacional e exportação (mil ton)	1.903,4	26,3	133,6			
(h)=(f-g) incremento potencial de óleo, limitado pelo co-produto determinante, disponível para biodiesel (mil ton)	8.481,6	68,1	183,7			
(i) incremento potencial de óleo, limitado pela produtividade e pela área agrícola, disponível para biodiesel (mil ton)	34.021,6	916,9	30.357,2	141.618,1	51.988,9	1.789,4
(j)=(h ou i) qual a restrição prevalente (mil ton)?	8.481,6	68,1	183,7	141.618,1	51.988,9	1.789,4
(k) densidade do óleo (kg/m3)	913,8	902,6	914,8	918,0	916,1	911,5
(l)= (j/k) incremento potencial na produção de óleo vegetal 2010-2030, em (mi m ³)	9,3	0,1	0,2	154,3	56,8	2,0
(m) o incremento potencial na produção de óleo é maior que o unidade de análise? (fluxo de ref.=10,8 mi m3)	NÃO	NÃO	NÃO	SIM (provável marginal)	SIM (provável marginal)	NÃO
(n) preço US\$/ton	848	1291	888	793	956	927
(o) óleo marginal para produção de biodiesel	-	-	-	Mais competitiva (marginal)	Menos competitiva	-

Fonte: O autor (2013)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças climáticas são um grave problema que vem causando eventos naturais mais severos, como furacões, enchentes, secas, entre outros, gerando prejuízos materiais e humanos. A principal causa da mudança climática é a emissão de gases estufa, provenientes principalmente da queima de combustíveis fósseis. No Brasil, a principal fonte emissora é a mudança no uso da terra. Os biocombustíveis, entre eles o biodiesel, aparecem como uma das soluções para mitigar o problema. Argumenta-se que as emissões desse tipo de combustível são neutralizadas pela absorção no processo de fotossíntese das matérias-primas agrícolas. Essa ideia, entretanto, pode ser contestada, tendo em vista que as cadeias produtivas dos biocombustíveis podem ter efeitos diretos e indiretos indesejáveis, também emissores de gases estufa, como, por exemplo, os desmatamentos.

Com isso, métodos mais completos de avaliação precisam ser desenvolvidos, aprimorados e empregados para fornecer resultados realistas acerca das emissões causadas por biocombustíveis. Entre esses métodos está a Avaliação Consequencial do Ciclo de Vida, que não é novo, mas tem sido pouco utilizado em razão da carência de publicações orientando a sua aplicação.

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO

O Quadro 6 mostra uma avaliação a partir da aplicação do método no presente estudo, fazendo uma comparação com a bibliografia acerca do assunto. As informações deste quadro, com relação aos tópicos e a avaliação de acordo com a bibliografia, são as mesmas apresentadas no Quadro 3 (seção 2.4.6).

Tópico	Avaliação de acordo com a bibliografia	Avaliação prática
Clareza do objetivo	Claro e direto: avalia conseqüências de ações.	(1)
Identificação dos processos afetados (marginais)	Pode haver dificuldade para identificação das tecnologias marginais, pois isso envolve relações econômicas.	(1) Obs. O procedimento carece de esclarecimentos acerca da aplicação de ferramentas econômicas. A metodologia determina a identificação do processo marginal (afetado), porém, na realidade, diversos processos podem ser afetados em diferentes proporções e isso não é bem descrito na metodologia.

continua

conclusão

Tópico	Avaliação de acordo com a bibliografia	Avaliação prática
Coleta de dados	Necessidade de coletar dados apenas para as partes afetadas no sistema de interesse, mas deve considerar efeitos indiretos.	(1)
Alocação	Geralmente adota a expansão do sistema para evitar a alocação. Desse modo, a incerteza inerente à alocação é eliminada.	(1) Obs. A incerteza inerente à alocação é eliminada, porém novas incertezas passam a fazer parte do estudo, sobretudo na identificação de processos afetados e substituições de produtos no mercado.
Aceitabilidade	Carece de procedimentos detalhados.	(1)
Recursos de modelagem	Há necessidade de modelos econômicos, além da modelagem baseada nas ciências naturais.	(1)
Completeza	É impossível avaliar a totalidade das conseqüências de ações. As cadeias de causa e efeito podem ser infinitas. Deve-se avaliar a significância para delimitação do estudo.	(1)
Aprendizado	Não fornece informações completas acerca do ciclo de vida de interesse, mas apresenta uma visão mais abrangente das conseqüências de decisões.	(1)
Custo do estudo	Impossível determinar um padrão. A modelagem econômica necessita de dados que podem não estar prontamente disponíveis.	(1)
Exatidão e precisão	Teoricamente mais exato, porém menos preciso.	(2) Obs. A metodologia tem a proposta de produzir um resultado mais realista do que um estudo atribucional. Na prática, entretanto, as incertezas com relação às variáveis econômicas podem não levar à exatidão desejada. No caso de elevadas incertezas na identificação de processos afetados, é aconselhável utilizar o método para formulação de cenários em lugar de um resultado determinístico.
Facilidade de compreensão dos resultados	Tende a ser conceitualmente mais complexo, porém com menor número de unidades de processo. Em geral, o conceito conseqüencial é bem compreendido.	(2) Como as cadeias de causa e efeito podem ser extensas, não é possível afirmar que um estudo conseqüencial possui um número pequeno de unidades de processo, ou um número menor do que um estudo atribucional. O conceito é de fácil compreensão, mas um determinado estudo pode ter uma complexa cadeia de causa e efeito que não é facilmente compreendida.

NOTA: (1) Totalmente de acordo (2) Parcialmente de acordo (3) Em desacordo

Quadro 6 – Avaliação da abordagem conseqüencial

Fonte: o autor (2013)

O presente estudo está, na maioria dos tópicos mostrados no Quadro 6, totalmente de acordo com a bibliografia acerca do tema. A principal dificuldade da aplicação do método, identificado tanto pela literatura quanto neste estudo, é a aplicação de ferramentas econômicas, pois o método aconselha o uso, por exemplo, de modelos de equilíbrio parcial, mas não oferece um detalhamento para aplicação. Na identificação de processos afetados, o método leva à determinação do processo marginal, mas na realidade podem existir diversos processos afetados, em diferentes proporções; neste sentido, a metodologia cita a possibilidade da aplicação de elasticidades, porém, para que o método se torne viável, há necessidade de esclarecimentos sobre este procedimento.

O presente estudo concorda parcialmente que um estudo consequencial produz um resultado menos preciso, porém mais exato. Dependendo das incertezas acerca das variáveis econômicas, é muito provável que o estudo não consiga oferecer precisão, nem exatidão, embora a proposta da metodologia seja bastante interessante e busque, de fato, um resultado mais realista. Diante de incertezas, é aconselhável que método seja utilizado para elaboração de cenários em lugar de oferecer um resultado determinístico. É importante ressaltar que, no presente trabalho, mesmo diante de incertezas, o método mostrou-se bastante útil, pois sistematiza a análise.

Outro tópico, com o qual o estudo concorda parcialmente é com relação à facilidade de compreensão dos resultados. Como as cadeias de causa e efeito podem ser bastante longas ou, até mesmo, infinitas, não é possível afirmar que um estudo consequencial possui um número pequeno de unidades de processo, ou um número menor do que um estudo atribucional. O conceito proposto pelo método é, sim, de fácil compreensão, mas um determinado estudo pode ter uma complexa cadeia de causa e efeito que não é facilmente compreendida.

Como pontos positivos do método, pode-se citar a clareza do objetivo e a eliminação da necessidade de alocação. O método apresenta uma proposta bastante interessante, que é a de avaliar as consequências de mudanças. Além disso, o método busca um resultado mais realista, levando em conta que o mercado não é perfeitamente elástico, como os estudos atribucionais consideram. Outro ponto que merece destaque é a eliminação da necessidade de alocação em processos multifuncionais. Os procedimentos de alocação agregam incerteza aos

resultados de um estudo e nos estudos de ACV consequential a alocação é evitada por meio da expansão do sistema.

Concluindo, percebe-se que o método possui potencial para aplicação na avaliação de consequências de mudanças, visando avaliar impactos ambientais de uma maneira realista. Contudo, o método carece de melhor detalhamento para que se torne viável. É aconselhável a colaboração de profissionais da área de ciências econômicas para a incorporação de ferramentas que proporcionem maior confiabilidade aos resultados dos estudos consequenciais. Diante disso, o método, tal como foi apresentado, pode ser utilizado na formulação de cenários.

5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTUDO DE CASO

Com relação aos resultados do presente estudo, o método delimitou seis matérias-primas possíveis para produção de biodiesel: soja, amendoim, algodão, dendê, girassol e canola. O estudo visa determinar qual dessas matérias-primas é a marginal e, também, realizar um inventário do uso do solo para atender ao incremento na demanda de óleo vegetal para produção de biodiesel no Brasil prevista para o ano de 2030. Depois de obtidos os resultados do cenário base, o estudo analisou três cenários alternativos com objetivo de verificar as mudanças no resultado em função de alterações em algumas variáveis.

Primeiramente, constata-se que o óleo de soja representa aproximadamente 75% do total da matéria-prima para produção nacional de biodiesel. Quanto ao mercado interno de óleo vegetal, a soja ocupou quase 90% do mercado em 2010. No mesmo ano, a área plantada com soja foi aproximadamente 21 vezes superior à área somada das outras oleaginosas incluídas no presente estudo e a produção agrícola 15 vezes superior; esses números demonstram a predominância dessa cultura. Mais de 80% da área de soja estava localizada nas regiões Centro-Oeste e Sul. Com relação à produção de óleo vegetal, a produção de óleo de soja foi quase 10 vezes superior à produção de óleo proveniente das demais culturas.

Dentre as culturas estudadas, as que apresentam maior área agrícola potencial para expansão são a soja (64 milhões ha), o girassol (57 milhões ha), o algodão (56 milhões ha) e o dendê (30 milhões ha). A soja e o girassol apresentam boa distribuição por todo território, seguidos pelo algodão. O dendê se concentra na região Norte do país, mas ainda assim apresenta boa possibilidade de expansão. A

canola e o amendoim tem possibilidade irrisória de expansão. É importante ressaltar que as áreas potenciais para expansão devem ser consideradas individualmente (*ceteris paribus*) e, portanto, não são cumulativas. Também é importante observar que nessa estimativa, realizada por WWF (2009), foram incluídos terrenos potencialmente agrícolas no cerrado e pastagens degradadas em todo país, excluídas as áreas de reserva legal e de preservação permanente. Desse modo, não há deslocamento de outras atividades. As áreas afetadas são aquelas decorrentes da produção agrícola (efeito direto) e da substituição de produtos no mercado pelos co-produtos. Em relação aos preços das terras, a região norte do Brasil é a que apresentava menor valor. Por outro lado, as terras na região sul são as mais caras.

A matéria-prima com maior possibilidade de incremento na produção de óleo vegetal, disponível para produção de biodiesel em 2030, é o dendê (141 milhões toneladas), seguido pelo girassol (52 milhões toneladas), pela soja (34 milhões toneladas) e pelo algodão (30 milhões toneladas). A canola e o amendoim tem potencial muito baixo. O incremento potencial na quantidade de óleo leva em conta o potencial de expansão de áreas agrícolas e o aumento da produtividade agrícola. Considerando que a indústria alimentícia é a aplicação prioritária, tanto do produto *in natura* quanto do óleo, são descontados os incrementos estimados destinados à exportação do produto *in natura*, à exportação de óleo e à utilização pela indústria alimentícia nacional. Nesse estudo não é levado em conta o possível aumento da produtividade em óleo de cada matéria-prima em função de melhorias genéticas, variedades, etc.

A partir dos dados acerca de áreas potenciais para expansão agrícola e potencial incremento na quantidade de óleo, percebe-se que o dendê apresenta cerca de 50% da área potencial para expansão em relação à soja, mas o potencial de produção de óleo é aproximadamente 4 vezes superior. O girassol também merece destaque, visto que a área potencial para expansão é 90% da área potencial para soja, porém a produção de óleo é quase 1,5 vezes maior.

É necessário analisar, contudo, além do potencial de expansão da produção agrícola proveniente de novas áreas e maior produtividade agrícola, também as restrições causadas pelos processos multifuncionais. Dendê, girassol e canola não apresentam esse tipo de restrição, tendo em vista que o óleo é o co-produto determinante nesses casos. Em contraste, os óleos de soja, amendoim e algodão são co-produtos dependentes e, por isso, as quantidades produzidas são limitadas

pela produção de farelo (no caso da soja e do amendoim) e da fibra (no caso do algodão).

Com isso, depois de analisadas as restrições, conclui-se que a previsão de incremento, disponível para produção de biodiesel, é de 154 milhões de m³ para o óleo de dendê, 57 milhões de m³ para o óleo de girassol, 4,7 milhões de m³ para o óleo de soja, 2 milhões de m³ para o óleo de canola, 38 mil m³ para o óleo de algodão e 33 mil m³ para o óleo de amendoim. Diante desses dados, e considerando que a unidade de análise é de 10,8 milhões m³ de óleo vegetal, conclui-se que há apenas duas matérias-primas com potencial para serem a matéria-prima marginal: dendê e girassol. Comparando preços de 2010 desses dois óleos no mercado internacional, percebe-se que o óleo de dendê é o mais competitivo e, portanto, a matéria-prima marginal. Vale ressaltar que o ideal é obter estimativas de preços no longo prazo para determinação da opção mais competitiva. Isso, porém, não foi possível nesse trabalho.

O resultado do inventário mostra que seria necessário um incremento de 2,12 milhões de hectares de área agrícola para produzir dendê, visando atender a unidade de análise de 10,8 milhões m³ de óleo vegetal em 2030. A localização do plantio seria a região Norte do Brasil, pois essa é a região marginal devido ao menor preço das terras agrícolas. Haveria uma redução de 633,7 mil hectares de área ocupada pela soja, também na região Norte, devido à substituição do farelo de soja, usado como ração animal, por torta de amêndoa, que é um co-produto do dendê. Por fim, o resultado líquido do inventário é igual a 1,5 milhões de hectares na região Norte. Com isso, para atender ao aumento previsto na produção de biodiesel entre 2010-2030 seria necessário cerca de 5% da área potencial para plantio de dendê no Brasil. Existe, portanto, um extraordinário potencial a ser explorado para produção de óleo vegetal de dendê e outros co-produtos, sem qualquer desmate de áreas nativas.

Com objetivo de mostrar variações nos resultados em função da alteração em algumas variáveis, três cenários alternativos foram desenvolvidos. O primeiro cenário alternativo adota a premissa de que nenhum incremento de produtividade ocorra para o dendê. A partir desta análise, percebe-se que o incremento potencial na quantidade de óleo de dendê disponível para biodiesel passaria a ser de 56,5 mi ton, em contraste com os 141,5 mi ton do cenário base. A disponibilidade de óleo de dendê para biodiesel seria, então, de 61,6 mi m³, quantidade suficiente para atender

a unidade de análise, que é de 10,8 mi m³. Com isso, as conclusões do estudo não mudam em relação ao cenário base.

O segundo cenário alternativo visa verificar alterações nos resultados do estudo em função da mudança do horizonte de tempo. Foi adotado o período 2010-2020. Neste cenário, partindo da premissa de que o aumento da produtividade ocorre, sobretudo, pelo desenvolvimento tecnológico ao longo dos anos, foi considerado um aumento de produtividade de 50% em relação ao incremento do estudo 2010-2030. Além disso, as estimativas de crescimento de produção e demanda adotam as mesmas taxas adotadas no cenário base, mas para um período de 10 anos. A unidade de análise adotada foi 50% do valor considerado no estudo 2010-2030, pois neste cenário temos metade do período. Pode-se observar que não há mudança na conclusão em relação ao cenário base. O óleo de soja, como co-produto dependente, tem sua produção limitada pelo farelo, que por sua vez apresenta um incremento menor do que no cenário base em razão do horizonte de tempo mais curto. Os óleos de dendê e girassol apresentam redução na disponibilidade para biodiesel devido exclusivamente ao menor incremento na produtividade, mas mesmo assim satisfazem a unidade de análise.

Por último, o terceiro cenário tem o objetivo de verificar alterações nos resultados do estudo em função da mudança na taxa de crescimento da produção do co-produto determinante. A taxa de crescimento considerada para produção do co-produto determinante passou de 2,2% para 3,7% a.a. O resultado mostra que não há mudança na conclusão em relação ao cenário base. Percebe-se, porém, que a disponibilidade de óleo de soja para biodiesel passa de 4,7 mi m³ para 9,3 mi m³, quase atingindo a unidade de análise.

5.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O presente trabalho adotou algumas simplificações. Primeiramente, foram utilizados preços no mercado internacional de óleo vegetal no ano de 2010 e preços de terras agrícolas do ano de 2006, onde deveriam ter sido utilizadas previsões de ambos para o ano de 2030. Esses dados, entretanto, não foram encontrados.

Foi utilizado simplesmente o preço do óleo vegetal para determinação da opção mais competitiva. Percebe-se, contudo, que o preço não é a única variável

que determina a competitividade de uma alternativa. Outros fatores, por exemplo o transporte, também determinam a competitividade.

Vale ressaltar que uma mudança, da magnitude da mudança na produção de biodiesel entre 2010-2030, não ocorre repentinamente, mas em degraus. Desse modo, pode haver variação no resultado do estudo quando se consideram períodos de tempo menores, que por sua vez, levam a um diferente resultado no longo prazo.

Finalmente, além das limitações do método consequencial, estudos prospectivos tem inerente incerteza, já que a economia é dinâmica, com evolução difícil de prever. Um exemplo disso é a determinação de co-produtos determinantes e dependentes; em função das condições do mercado, um produto que atualmente é determinante pode se tornar dependente no futuro.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A. L. *et al.* Utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de ruminantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. spe, 2008.
- AMARAL, D. F. Panorama do mercado de oleaginosas: aproveitamento para produção de óleos e derivados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 4., 2010, João Pessoa; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 1, 2010, João Pessoa. **Palestra**. Disponível em: <http://www.abiove.com.br/palestras_br.html>. Acesso em: 04/11/2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040:2006**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2006a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044:2006**. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Avaliação do impacto do ciclo de vida. Rio de Janeiro, 2006b.
- AZAPAGIC, A.; CLIFT, R. Linear programming as a tool in life cycle assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 3, n. 6, p. 305-316, 1998.
- AZAPAGIC, A.; CLIFT, R. Allocation of environmental burdens in multiple-function systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 7, n. 2, p. 101-119, 1999.
- BALAZINA, A. Moratória da soja deu resultado, diz relatório. **Folha de S. Paulo**, São Paulo, 01 abr. 2008. Caderno Ciência.
- BARBOSA, M. Z. Óleos vegetais para alimentos ou para biodiesel? **Análises e indicadores do agronegócio**, v. 6, n. 6, p. 1-6, jun. 2011.
- BARCELOS, E. *et al.* **A cultura do dendê**. Brasília: Embrapa, 1995. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/100649>>. Acesso em: 10/06/2011.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Anuário estatístico 2011**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=57890>. Acesso em: 15/10/11

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Boletins ANP (jan. a dez/2012)**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=67621&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1378670841926>>. Acesso em: 15/08/2013.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Boletins ANP (jan. a jun/2013)**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=67621&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1378670841926>>. Acesso em: 15/08/2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA); Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). **Cadeia produtiva do algodão**. Brasília: IICA: MAPA/SPA, 2007. Convênio. Disponível em: <<http://ceragro.iica.int/obsevatorio/Lists/Estudos/DispForm.aspx?ID=10>>. Acesso em: 18/08/2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Projeções do Agronegócio: Brasil 2009/2010 a 2019/2020**. Brasília: MAPA/ACS, 2010. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 30/08/2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Anuário estatístico da agroenergia 2010**. 2. ed. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 30/05/2011.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA); Universidade Federal de Viçosa (UFV). **Viabilidade de extração de óleo de dendê no estado do Pará. Texto para revisão e crítica**. Viçosa, 2007. Convênio. Disponível em: <http://www.mda.gov.br/portal/saf/arquivos/view/biodisel/18_-_Dende.pdf>. Acesso em: 05/11/2011.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). **Comunicação nacional inicial do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**.

Brasília: MCT, 2004. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 05/04/2009.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). **Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília: MCT, 2010. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 25/08/2013.

BRUNSTEIN, I. **Economia de empresas: gestão econômica de negócios**. São Paulo: Atlas, 2005.

CASTRO, A. M. G. de; LIMA, S. M. V.; SILVA, J. F. V. (Eds). **Complexo agroindustrial de biodiesel no Brasil: competitividade das cadeias produtivas de matérias-primas**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2010.

CAVALETT, O.; ORTEGA, E. Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 1, p. 55–70, Jan. 2010.

CERRI, C. E. P. *et al.* Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CERRI, C. C. *et al.* Brazilian Greenhouse Gas Emissions: The Importance of Agriculture and Livestock. **Scientia Agricola**, v.66, n.6, pp. 831-843, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). Superintendência Regional da Bahia e Sergipe. **Dendeicultura da Bahia**. Ago. 2006. Disponível:<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/sureg/BA/dendeicultura_na_bahia.pdf>. Acesso em: 19/10/2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). **Indicadores da agropecuária**. Ano XIX, n.11, nov. 2010. Brasília, 2010. Disponível em: www.conab.gov.br. Acesso em: 13/08/2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). **Séries históricas**. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2>>. Acesso em: 12/11/2011.

CURRAN, M. A.; MANN, M.; NORRIS, G. The international workshop on electricity data for life cycle inventories. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 8, p. 853-862, 2005.

CURRAN, M. A. **Life cycle assessment: principles and practice**. USA: Environmental Protection Agency, 2006. Disponível em: <<http://www.cs.ucsb.edu/~chong/290N/EPAonLCA2006.pdf>>. Acesso em: 28/07/2009.

DALGAARD, R. *et al.* LCA of soybean meal. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 8, p. 240-254, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Sistemas de produção. Cultivo do amendoim**. Brasília, 2006. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/publicacoes/transferecia/sistemas-de-producao/>>. Acesso em: 05/10/2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf>. Acesso em: 15/04/2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço energético nacional 2011: ano base 2010**. Rio de Janeiro: EPE, 2011. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso em: 26/10/2011.

EKVALL, T.; TILLMAN, A. M. Open-loop recycling: criteria for allocation procedures. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 2, n. 3, p. 155-162, 1997.

EKVALL, T.; FINNVEDEN, G. Allocation in ISO 14041—a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 9, n. 3, p. 197–208, 2001.

EKVALL, T. Cleaner production tools: LCA and beyond. **Journal of Cleaner Production**, v. 10, n. 5, p. 403–406, 2002.

EKVALL, T. *et al.* Evaluation of attributional and consequential life cycle assessment. In: SETAC-EUROPE ANNUAL MEETING, 14., 2004, Prague, Czech Republic. **Working paper distributed.**

EKVALL, T.; WEIDEMA, B. System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 3, p. 161-171, 2004.

EKVALL, T.; TILLMAN, A. M.; MOLANDER, S. Normative ethics and methodology for life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 13-14, p. 1225-1234, 2005.

ERNSTING, A.; RUGHANI, D.; BOSWELL, A. **Agrofuels threaten to accelerate global warming**. 2007. Disponível em: <<http://www.biofuelwatch.org.uk>>. Acesso em: 20/12/2008.

EUROPEAN COMMISSION. **ILCD Handbook**: general guide for life cycle assessment. European Union: Joint Research Centre: Institute for Environment and Sustainability, 2010. Disponível em: <<http://ict.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12March2010.pdf>>. Acesso em: 30/09/2010.

FARGIONE, J. *et al.* Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, v. 319, p. 1235-1238, 2008.

FINKBEINER, M. *et al.* The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 e ISO 14044. . **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 2, p. 80-85, 2006.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **World agriculture towards 2015/2030**: an FAO perspective. London, 2003. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/005/Y4252E/y4252e00.HTM>> Acesso em: 03/11/2011.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **World agriculture towards 2030/2050**: prospects for food, nutrition, agriculture and major commodity groups. Rome, 2006. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/009/a0607e/a0607e00.htm>> Acesso em: 03/11/2011

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The State of Food and Agriculture. Biofuels: prospects, risks and opportunities.** Roma, 2008. Disponível em: < <http://www.fao.org/>>. Acesso em: 05/02/2009.

FREITAS, S. M. de; FERREIRA, C. R. R. P. T.; TSUNECHIRO, A. O mercado de óleos vegetais e o potencial da cultura do girassol no Brasil, 1993-96. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 7-20, fev. 1998.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N. (Eds). **Overview and. Methodology.** Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007. Disponível em: <http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/01_OverviewAndMethodology.pdf>. Acesso em: 10/09/2009.

FURLAN JÚNIOR, J. **Dendê: manejo e uso dos subprodutos e dos resíduos.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. Disponível em: < <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/391512>>. Acesso em: 10/06/2011.

GARAGORRY, F. L. *et al.* **Concentração e dinâmica de 15 produtos agroenergéticos no período de 1990 a 2006.** Brasília: Embrapa, 2010. Disponível em: < <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/891232>>. Acesso em: 10/06/2011.

GASQUES, J. G.; BASTOS, E. T.; VALDES, C. Preços da terra no Brasil. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Anais.** Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/9/587.pdf>>. Acesso em: 11/12/2011.

GERPEN, J. V. *et al.* **Biodiesel production technology.** USA: NREL, 2004. Disponível em: < <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36244.pdf>>. Acesso em: 16/05/2009.

GUINÉE, J. B. *et al.* **Life Cycle Assessment: an operational guide to the ISO standards.** Bèta Vertalingen: Maastricht, 2001.

HAES, H. U. *et al.* **Life-Cycle Impact Assessment: striving towards best practice.** USA: SETAC, 2002.

HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J. B. Allocation and 'what-if' scenarios in life cycle assessment of waste management systems. **Waste Management**, v. 27, n. 8, p. 997–1005, 2007.

IBENHOLT, K. Materials flow analysis and economic modeling. In: AYRES, R. U.; AYRES, L. W. (Eds.). **A handbook of industrial ecology**. Cheltenham, UK: Edward Elgar, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4)**. Genebra, 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 20/04/2009.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Biocombustíveis no Brasil: etanol e biodiesel**. Comunicado 53. Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro. Maio, 2010. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/100526_comunicadodoipea_53.pdf>. Acesso em: 19/05/2011.

JANTALIA, C. P. *et al.* Mudanças no estoque de C do solo em áreas de produção de grãos: avaliação do impacto do manejo do solo. In: ALVES, B. J. R. *et al.* (Eds.). **Manejo de sistemas agrícolas: impacto no seqüestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa**. Porto Alegre: Genesis, 2006.

KARMAKAR, A.; KARMAKAR, S.; MUKHERJEE, S. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 19, p. 7201-7210, Oct. 2010.

KLØVERPRIS, J.; WENZEL, H.; NIELSEN, P. H. Life cycle inventory modelling of land use induced by crop consumption. Part 1: conceptual analysis and methodological proposal. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 1, p. 13-21, 2008.

KLØVERPRIS, J.; BALTZER, K.; NIELSEN, P. H. Life cycle inventory modelling of land use induced by crop consumption. Part 2: example of wheat consumption in Brazil, China, Denmark and the USA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 1, p. 90-103, 2010.

KOTLER, P. **Administração de marketing**. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

LAPOLA, D. M. *et al.* Indirect land–use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, 2009, doi: <10.1073/pnas.0907318107>.

MANZINI, E; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**. São Paulo: Edusp, 2005.

MEDINA, H. Governo enterra de vez biodiesel feito só com mamona. **Folha de S. Paulo**, São Paulo, 29 jul. 2008. Caderno Dinheiro.

MELILLO, J. M. *et al.* Indirect emissions from Biofuels: How Important? **Science**, v. 326, p. 1397-1399, 2009.

MOTTA, R. S. da. **Economia ambiental**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.

MOURAD, A. L. **Avaliação da cadeia produtiva de biodiesel obtido a partir da soja**. 123 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2008.

MÜLLER, A. A.; FURLAN JÚNIOR, J.; CELESTINO FILHO, P. **A Embrapa Amazônia Oriental e o agronegócio do dendê no Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. Disponível: <
<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/394940> >. Acesso em: 27/07/2010.

NOGUEIRA, L. A. H. Does biodiesel make sense? **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3659-3666, Jun. 2011.

NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S. Biofuels in Brazil: evolution, achievements and perspectives on food security. **Global Food Security**, v. 2, n. 2, p. 117–125, Jul. 2013.

OLIVEIRA, M. F.; VIEIRA, O. V. **Extração de óleo de girassol utilizando miniprensa**. Londrina: Embrapa Soja, 2004. Disponível em: <
http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?cod_pai=4&op_page=73 >. Acesso em: 05/09/2010.

PERES, J. R. R.; BELTRÃO, N. E. M. Oleaginosas para o biodiesel: situação atual e potencial. In: FERREIRA, J. R.; CRISTO, C. M. P. N. (Coords.). **O futuro da indústria: biodiesel**. Coletânea de artigos. Brasília: MDIC-STI/IEL, 2006.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Microeconomia**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

POMMER, K. *et al.* **Handbook on environmental assessment of products**. Environmental project N° 813. Danish Environmental Protection Agency. 2003. Disponível em: < <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2003/87-7972-683-6/pdf/87-7972-684-4.pdf>>. Acesso em: 16/07/2011.

RAMALHO FILHO, A.; MOTTA, P. E. F. da (Coords). **Zoneamento agroecológico do dendezeiro para as áreas desmatadas da amazônia legal**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2010. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/zoneamento_dende/ZonDende.pdf> Acesso em: 15/11/2011.

REINHARD, J.; ZAH, R. Global environmental consequences of increased biodiesel consumption in Switzerland: consequential life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, supplement 1, p. S46-S56, Nov. 2009.

ROSELL, J. C. G., MOISANDER, J. Ethical dimensions of sustainable marketing: a consumer policy perspective. **European Advances in Consumer Research**. V. 8, 2008. Disponível em: <www.acrwebsite.org>. Acesso em: 27/09/2009.

SANDRONI, P. **Dicionário de economia do século XXI**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Record, 2005.

SANTANA *et al.* **Productive capacity of Brazilian agriculture: a long-term perspective**. Foresight Project on Global Food and Farming Futures. London: Government Office for Science, 2011. Disponível em: <<http://www.bis.gov.uk/Foresight>>. Acesso em: 03/12/2011.

SCHMIDT, J. H. System delimitation in agricultural consequential LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 4, p. 350-364, 2008.

SEARCHINGER, T. *et al.* Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land–use change. **Science**, v. 319, p. 1238-1240, 2008.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **Cartilha Sebrae sobre biodiesel**. [200?]. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/galerias/arquivos/biodiesel/Cartilha_Sebrae_portugues.pdf>. Acesso em: 23/07/2009.

THE NATURE CONSERVANCY (TNC). **Boas práticas agrícolas e certificação ambiental: a caminho da sustentabilidade**. 2. ed. 2012. Disponível em: <<http://portugues.tnc.org/comunicacao-midia/publicacoes/index.htm>>. Acesso em: 10/09/2012.

TILLMAN, A. M. Significance of decision-making for LCA methodology. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 20, n. 1, p. 113-123, 2000.

TOMM, G. O. *et al.* **Panorama atual e indicações para aumento de eficiência da produção de canola no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do118.htm>. Acesso em: 05/09/2011.

TYSON, K. S. *et al.* **Biomass oil analysis: research needs and recommendations**. USA: NREL, 2004. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34796.pdf>>. Acesso em: 12/08/2010.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME (UNEP). **Global Environmental Outlook 5**. New York, 2012. Disponível em: <http://www.unep.org/geo/geo5.asp>. Acesso em: 10/09/2013.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Oilseeds: world markets and trade**. Circular Series, May 2011. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/oilseeds/circular/2011/May/oilseeds.pdf>>. Acesso em: 17/07/2011.

VEIGA, J. E. da. **Sustentabilidade: a legitimação de um novo valor**. São Paulo: Senac, 2010.

WEIDEMA, B. P.; FREES, N.; NIELSEN, A. M. Marginal Production Technologies for Life Cycle Inventories. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 4, n. 1, p. 48-56, 1999.

WEIDEMA, B. P. **Market information in life cycle assessment**. Environmental project N° 863. Danish Environmental Protection Agency. 2003. Disponível em: <<http://www.lca-net.com/publications/older/>>. Acesso em: 29/04/2009.

WEIDEMA, B. P.; EKVALL, T. **Guidelines for applications of deepened and broadened LCA: consequential LCA**. Chapter for CALCAS project. Deliverable D18, 2009. Disponível em: <http://www.lca-net.com/files/consequential_LCA_CALCAS_final.pdf >. Acesso em 21/08/2009.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI); WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Product life cycle accounting and reporting standard. Greenhouse gas protocol**. USA: WRI/WBCSD, 2011.

WORLD WILDLIFE FUND (WWF). **O impacto do mercado mundial de biocombustíveis na expansão da agricultura brasileira e suas conseqüências para as mudanças climáticas**. Brasília: WWF, 2009. Disponível: <<http://www.wwf.org.br/informacoes/biblioteca/>>. Acesso em: 07/09/2011.

ZAMAGNI, A. *et al.* **Critical review of the current research needs and limitations related to ISO-LCA practice**. Chapter for CALCAS project. Deliverable D7, 2008. Disponível em: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/calcas_report_d7.pdf>. Acesso em: 21/08/2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – EMISSÕES DE GEE NO BRASIL NO PERÍODO 1990-2005.....	131
APÊNDICE B – FASES DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	132
APÊNDICE C – ANÁLISE ECONÔMICA EM ACV CONSEQUENCIAL.....	144
APÊNDICE D – IDENTIFICAÇÃO DO CO-PRODUTO DETERMINANTE EM PROCESSOS MULTIFUNCIONAIS.....	152

APÊNDICE A – EMISSÕES DE GEE NO BRASIL NO PERÍODO 1990-2005

Setor	Ano	Unidade	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFC-23	HFC-125	HFC-134a	HFC-143a	HFC-152a	CF ₄	C ₂ F ₆	SF ₆	NO _x	CO	MMVOC	
Energia	1990	Gg	179.948	427	8,5									1.781	14.919	1.022	
	1994		206.250	382	9,0										1.996	14.438	974
	2000		289.958	388	9,6										2.334	11.415	860
	2005		313.695	541	12,1										2.388	11.282	958
	Var. 90 / 00		61	-9	14										31	-23	-16
	Var. 90 / 05	%	74	27	43									34	-24	-6	
Processos Industriais	1990	Gg	45.265	5,1	10,7	0,120	-	0,0004	-	-	0,302	0,026	0,010	8	365	322	
	1994		48.703	6,5	16,3	0,157	-	0,0685	-	-	0,323	0,028	0,014	11	510	382	
	2000		63.220	8,9	19,9	-	0,0071	0,4713	0,0075	0,0001	0,147	0,012	0,015	14	542	474	
	2005		65.474	9,2	22,8	-	0,1249	2,2819	0,0929	0,1748	0,124	0,010	0,025	18	626	599	
	Var. 90 / 00		40	73	87	-100	NA	108.876	NA	NA	-52	-56	54	69	48	47	
	Var. 90 / 05	%	45	79	114	-100	NA	527.498	NA	NA	-59	-61	153	128	71	86	
Uso de Solventes e Outros Produtos	1990	Gg														350	
	1994															435	
	2000															473	
	2005															595	
	Var. 90 / 00															35	
	Var. 90 / 05	%													70		
Agropecuária	1990	Gg		9.539	334									219	2.543	NE	
	1994			10.237	369									233	2.741	NE	
	2000			10.772	393									181	2.131	NE	
	2005			12.768	476									237	2.791	NE	
	Var. 90 / 00			12,9	17,6										-17		
	Var. 90 / 05	%	33,9	42,7										8			
Mudança do Uso da Terra e Florestas	1990	Gg	766.493	1.996	13,7									496	17.468	NE	
	1994		830.910	2.238	15,4									556	19.584	NE	
	2000		1.258.345	3.026	20,8									752	26.476	NE	
	2005		1.258.626	3.045	20,9									757	26.641	NE	
	Var. 90 / 00		64	52	52									52	52		
	Var. 90 / 05	%	64	53	53									53	53		
Tratamento de Resíduos	1990	Gg	24	1.227	9,0												
	1994		63	1.369	10,8												
	2000		92	1.658	12,4												
	2005		110	1.743	14,0												
	Var. 90 / 00		276	35	37												
	Var. 90 / 05	%	349	42	54												
TOTAL	1990	Gg	991.731	13.195	376	0,120	-	0,000	-	-	0,302	0,026	0,010	2.504	35.296	1.693	
	1994		1.085.925	14.233	421	0,157	-	0,068	-	-	0,323	0,028	0,014	2.797	37.273	1.791	
	2000		1.611.615	15.852	455	-	0,007	0,471	0,007	0,0001	0,147	0,012	0,015	3.280	40.563	1.807	
	2005		1.637.905	18.107	546	-	0,125	2,282	0,093	0,175	0,124	0,010	0,025	3.399	41.339	2.152	
	Var. 90 / 00		63	20	21	-100	NA	108.876	NA	NA	-52	-56	54	31	15	7	
	Var. 90 / 05	%	65	37	45	-100	NA	527.498	NA	NA	-59	-61	153	36	17	27	

Fonte: MCT (2010)

APÊNDICE B – FASES DE UM ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Um estudo de ACV é composto por quatro fases (ABNT, 2006a, 2006b):

- a) definição de objetivo e escopo;
- b) análise de inventário do ciclo de vida;
- c) avaliação de impactos do ciclo de vida;
- d) interpretação do ciclo de vida.

A Figura 21 mostra as quatro fases e suas inter-relações, bem como algumas aplicações de estudos de ACV.

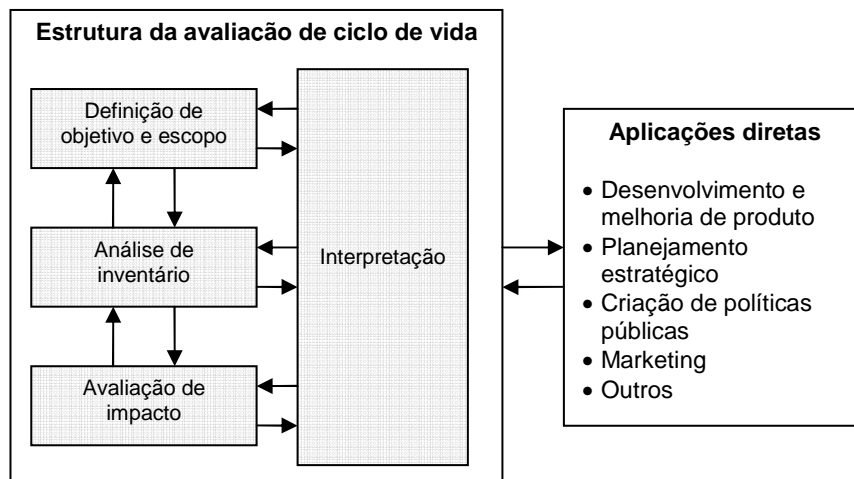


Figura 21 - Fases da ACV

Fonte: ABNT (2006a)

Um estudo completo, que inclui as quatro fases, é denominado estudo de avaliação do ciclo de vida (estudo de ACV). Em alguns casos, porém, o objetivo pode ser alcançado com um estudo de inventário do ciclo de vida (estudo de ICV). Estudos de ICV são semelhantes aos estudos de ACV, mas excluem a fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV). Não se deve confundir a fase de análise de inventário (ICV) com estudos de ICV (ABNT, 2006a).

(a) Definição de objetivo e escopo

O objetivo de uma ACV estabelece três pontos importantes: a aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo e o público-alvo. O escopo, por sua vez, deve ser definido para assegurar que a abrangência, a profundidade e o detalhamento do estudo sejam suficientes para atender ao objetivo declarado

(ABNT, 2006a, 2006b). Deve-se levar em conta a disponibilidade de tempo e recursos para realização do estudo, de modo a definir objetivo e escopo factíveis (GUINÉE *et al.*, 2001; CURRAN, 2006). Em função de situações não previstas, o objetivo e o escopo do estudo podem ser revisados, visto que estudos de ACV podem ser iterativos.

O escopo é composto principalmente pela definição dos seguintes itens (ABNT, 2006a, 2006b):

- a) funções do sistema de produto;
- b) unidade funcional;
- c) sistema de produto a ser estudado;
- d) fronteiras do sistema de produto;
- e) procedimentos de alocação;
- f) categorias de impacto e metodologia para avaliação de impactos;
- g) tipos e fontes de dados;
- h) requisitos quanto à qualidade dos dados;
- i) tipo de revisão crítica, se aplicável;
- j) limitações e pressupostos.

De acordo com Guinée *et al.* (2001), ABNT (2006a, 2006b), funções são serviços prestados pelo produto. A função a ser considerada no estudo deve ser quantificada pela unidade funcional. Desse modo, torna-se possível o tratamento de diferentes produtos como funcionalmente equivalentes, garantindo a correta comparação entre eles. Conforme European Commission (2010), a unidade funcional deve responder as seguintes perguntas: o quê, em qual quantidade, com qual qualidade e por quanto tempo. Por exemplo, um estudo acerca do desempenho ambiental de diversas alternativas para proteção de uma parede poderia ter a seguinte unidade funcional: proteger uma parede (o quê) de 1m² (quantidade) com opacidade³³ de 99,9% (qualidade) durante 10 anos (período de tempo).

A partir da unidade funcional, os fluxos de referência podem ser determinados para cada um dos produtos alternativos que cumprem uma função específica. O fluxo de referência é a quantidade do produto acabado, ou de cada um dos produtos alternativos analisados, necessária para desempenhar a função, na quantidade definida pela unidade funcional (GUINÉE *et al.*, 2001; ABNT, 2006a,

³³ Qualidade, estado ou propriedade do que é opaco; ausência de transparência.

2006b). Posteriormente, todas as entradas e saídas do sistema de produto serão quantificadas com base no fluxo de referência. A Figura 22 ilustra os conceitos de função, unidade funcional e fluxo de referência.

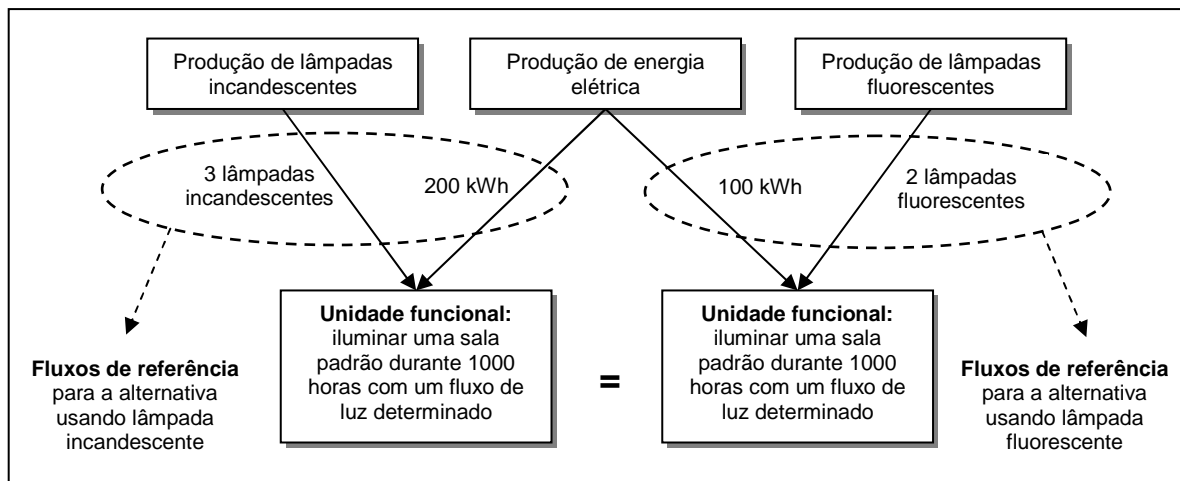


Figura 22– Função, unidade funcional e fluxo de referência

Fonte: Adaptado de Guinée et al. (2001)

A Figura 22 mostra a comparação de dois sistemas alternativos para iluminação de uma sala. A unidade funcional pode ser definida, nesse caso, como: iluminação de uma sala padrão pelo período de 1000 horas com determinado fluxo de luz. Os fluxos de referência para atender essa unidade funcional podem ser: três lâmpadas incandescentes para o primeiro sistema de produto e duas lâmpadas fluorescentes para o segundo. A energia necessária para o uso das lâmpadas durante o período determinado pela unidade funcional também é fluxo de referência, 200 kWh para a alternativa com lâmpada incandescente e 100 kWh para lâmpada fluorescente. Pode haver, portanto, um conjunto de fluxos de referência para cada sistema de produto.

De acordo com WRI (2011), há estudos cujo produto em análise é um produto final, com função conhecida e bem definida. Produtos finais são mercadorias ou serviços consumidos pelo usuário final em lugar de serem usados na produção de outras mercadorias ou serviços. Por outro lado, há estudos cujo produto de interesse é um produto intermediário. Produtos intermediários são insumos que entram no ciclo de vida de um determinado produto final. Diante disso, WRI (2011) utiliza o conceito de “unidade de análise”. A “unidade de análise” é o foco de um estudo de ACV. Caso o estudo de ACV tenha como foco um produto final, então a

unidade de análise é a unidade funcional. Entretanto, se o foco do estudo for um produto intermediário, numa determinada quantidade, então a unidade de análise é o fluxo de referência e, nesse caso, não há unidade funcional. A regra ao definir o fluxo de referencia como a unidade de análise é adotar uma quantidade que forneça um resultado significativo para o inventário. Esta quantidade pode ser uma unidade do produto de interesse, caso chegue-se a conclusão que essa é uma quantidade significativa para as partes interessadas, ou a quantidade, ou o peso, de um lote padrão do produto.

De acordo com as normas técnicas, existe uma nomenclatura e subdivisões que são característicos para os componentes dos sistemas estudados em ACV. A Figura 23 apresenta um sistema de produto hipotético e seus diversos componentes.

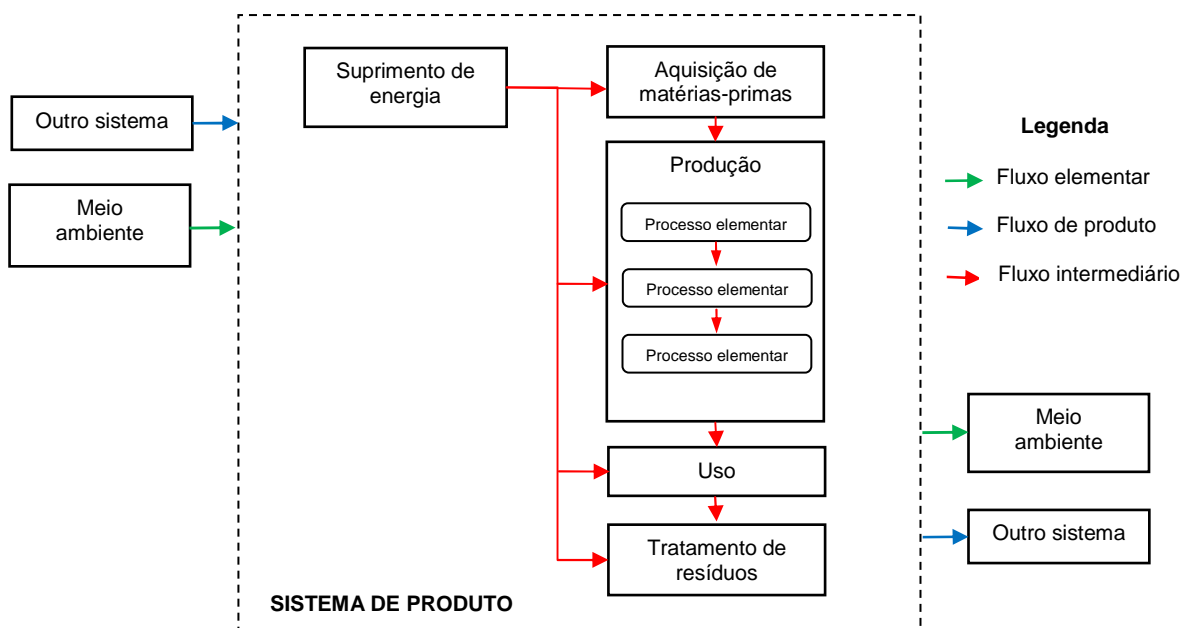


Figura 23 - Exemplo de um sistema de produto para ACV
Fonte: Adaptado de ABNT (2006a)

Entende-se por sistema de produto a delimitação do ciclo de vida a ser estudado. Sistemas de produto são compostos por processos elementares, que são os menores elementos de um sistema de produto para os quais são quantificados dados de entrada e de saída (ABNT, 2006a). Na Figura 23, qualquer etapa do ciclo de vida poderia, a princípio, ser decomposta em diversos processos elementares, como ilustrado na fase de produção.

Ainda conforme ABNT (2006a), os fluxos entre processos elementares dentro de um mesmo sistema de produto, são denominados fluxos intermediários. Quando um processo do sistema de produto estudado está ligado a outro sistema de produto, esse fluxo é denominado fluxo de produto. E, finalmente, se o fluxo é proveniente do meio ambiente ou com destino ao meio ambiente, trata-se de um fluxo elementar. Os fluxos elementares incluem, portanto, o uso de recursos e as emissões para o ar, água e solo, associados ao sistema estudado.

Em suma, a fronteira do sistema de produto define os processos elementares a serem incluídos no estudo. Para que o estudo seja completo é conveniente que o sistema de produto seja estabelecido de maneira que as entradas e saídas nas suas fronteiras sejam todos fluxos elementares, além do produto que desempenha a função de interesse (EUROPEAN COMMISSION, 2010). Entretanto, em razão da disponibilidade de recursos e tempo, e também do objetivo do estudo, deverão ser tomadas decisões acerca de quais processos elementares serão incluídos no estudo e o nível de detalhamento com que esses processos elementares deverão ser estudados (ABNT, 2006b).

Outra definição a ser feita na fase de escopo é com relação aos tipos e fontes de dados. Os dados podem ser: medidos, calculados ou estimados (ABNT, 2006b). Exemplos de fontes de dados são: leitura em equipamentos, relatórios industriais ou governamentais, testes em laboratório, livros, periódicos, etc. (CURRAN, 2006). Os dados também devem ser classificados em entradas e saídas. As entradas podem incluir recursos minerais, suprimento de energia, entre outros. As saídas podem ser classificadas em: emissões para o ar, para o solo, e para a água (ABNT, 2006b).

Os requisitos de qualidade dos dados necessários para que o objetivo e escopo possam ser alcançados também devem ser especificados (ABNT, 2006b). A norma aconselha que os seguintes tópicos sejam definidos:

- a) cobertura temporal: idade dos dados e período mínimo de coleta;
- b) cobertura geográfica (por exemplo: local, regional, global);
- c) cobertura tecnológica: tecnologia específica ou média de tecnologias;
- d) precisão: medida da variabilidade (por exemplo, variância);
- e) completeza: percentagem dos fluxos que deve ser incluída;

- f) representatividade: grau em que os dados refletem a verdadeira população de interesse (por exemplo, representatividade geográfica, tecnológica e temporal);
- g) consistência: aplicação uniforme da metodologia do estudo aos diversos componentes da análise;
- h) reprodutibilidade: grau em que as informações permitiriam reproduzir os resultados do estudo;
- i) especificação das fontes dos dados.

O escopo do estudo deverá, também, definir se uma revisão crítica é necessária e, caso seja, como e por quem será realizada. Além disso, as limitações e suposições utilizadas no estudo devem ser declaradas.

(b) Análise de Inventário

A análise de inventário do ciclo de vida (ICV) é o processo de compilação e quantificação das entradas e saídas de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ABNT, 2006a, 2006b). Essas quantidades devem ser proporcionais ao fluxo de referência. Em função do volume de trabalho demandado, normalmente a etapa de inventário é a que consome maiores esforços e recursos em uma ACV (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Os fluxos de entrada e saída podem ser classificados em categorias para proporcionar melhor compreensão e transparência (ABNT, 2006b). De acordo com European Commission (2010), uma das formas de classificação das entradas e saídas é conforme os tipos de fluxos, já descritos anteriormente, como fluxos elementares, fluxos de produtos e fluxos intermediários. Além disso, de acordo com o objetivo e escopo do estudo, podem ser necessárias outras informações, tais como a descrição das características de processos e produtos. Guinée *et al.* (2001) acrescentam que, além da desagregação em termos de entradas e saídas, esses dados devem ser compilados separadamente para cada processo elementar.

Com relação à agregação de dados, a ABNT (2006b) aconselha que tal procedimento seja feito somente para substâncias equivalentes e para impactos ambientais semelhantes. O Quadro 6 mostra um exemplo de subdivisão dos fluxos elementares que pode ser adotada em inventários.

Categoria	Subcategoria	Exemplo
Emissões para o ar	Baixa densidade populacional	Mineração, agricultura
	Alta densidade populacional	Gases industriais
	Baixa estratosfera	Aeronaves
Emissões para o solo	Agricultura	Herbicida
	Silvicultura	Fungicida
	Indústria	Resíduos
Emissões para a água	Subsolo	Contaminação do lençol freático
	Lago	Esgoto
	Oceano	Resíduos do transporte marítimo
	Rio	Efluentes industriais
Recursos	No ar	Gases obtidos do ar
	No solo	Minérios
	Na água	Captação de água
	Terras	Ocupação e transformação do solo
	Biótico	Madeira

Quadro 7 – Exemplo de classificação dos fluxos elementares

Fonte: Adaptado de Frischknecht e Jungbluth (2007)

Em seguida à coleta de dados, alguns procedimentos de cálculo devem ser realizados (ABNT, 2006a, 2006b):

- a) validação dos dados: entre as ferramentas para validação de dados estão: balanço de massa, balanço de energia e a comparação com dados de outras fontes. Após essa verificação, os dados considerados inadequados devem ser substituídos. No caso da arbitragem de dados ou utilização de valores de tecnologias similares, isso deve ser declarado e justificado (GUINÉE *et al.*, 2001; ABNT, 2006b);
- b) correlação à unidade funcional: os dados do inventário devem ser quantitativamente expressos como fluxos por unidade funcional. Por exemplo, se o fluxo de referência é 1 MJ de valor calorífico inferior gerado por uma caldeira e uma das saídas do sistema é a emissão de CO₂ para o ar, deve-se calcular a massa de CO₂ emitida correspondente à geração de 1 MJ de calor (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

(c) Avaliação de impacto

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) tem como objetivo estudar a magnitude e a significância dos impactos ambientais potenciais do produto (ABNT, 2006a; ABNT, 2006b). A partir da lista de emissões e de uso de recursos resultante do ICV, a AICV agrega as intervenções ambientais em categorias de impacto. Feito isso, calcula-se um indicador para cada categoria, ou até mesmo um único indicador final. Como resultado, é possível identificar os processos que mais contribuem para o impacto ambiental total de determinado produto, assim como fazer comparações entre produtos (HAES *et al.*, 2002).

A desagregação da fase de AICV em diferentes elementos é útil principalmente porque proporciona maior transparência ao estudo (ABNT, 2006a). Há elementos obrigatórios e opcionais, conforme apresentado pela Figura 24.

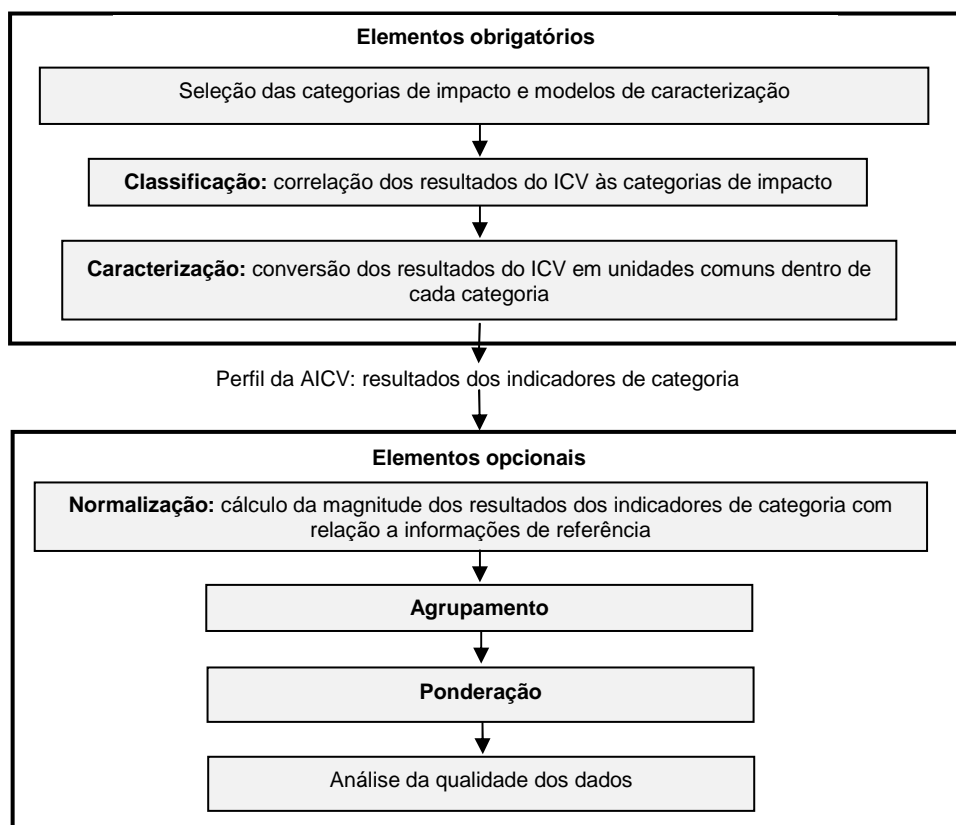


Figura 24 – Elementos da fase de AICV

Fonte: ABNT (2006a)

De acordo com ABNT (2006a), ABNT (2006b), categorias de impacto são classes que representam as questões ambientais importantes às quais os resultados

da análise do inventário do ciclo de vida devem ser associados. Dependendo do objetivo e escopo, devem ser selecionadas as categorias de interesse do estudo.

Na etapa de classificação, mostrada na Figura 24, cada item do inventário é associado com as categorias de impacto para as quais contribui.

A etapa seguinte é denominada caracterização. Tendo em vista que diferentes substâncias possuem diferentes potenciais de impacto, a caracterização converte os resultados do ICV em relação a uma referência dentro de cada categoria. Essa conversão utiliza fatores de caracterização. A unidade comum permite o cálculo do resultado do indicador de categoria. O conjunto de indicadores de categoria resultante dos cálculos de caracterização é denominado perfil de AICV.

O Quadro 7 apresenta, como exemplo, três categorias de impacto e seus respectivos fatores de caracterização. Há, entretanto, muitas outras categorias, tais como: toxicidade humana, ecotoxicidade, eutrofização, radiação ionizante, entre outras (GUINÉE *et al.*, 2001).

Categoria de Impacto	Exemplo de classificação de dados do ICV	Possível fator de caracterização	Descrição do fator de caracterização
Aquecimento global	Dióxido de carbono (CO ₂)	Potencial de aquecimento global	Converte os dados do ICV em dióxido de carbono (CO ₂) equivalente
	Dióxido de nitrogênio (NO ₂)		
	Metano (CH ₄)		
	Clorofluorcarbono (CFC)		
Destruição da camada de ozônio	Clorofluorcarbono (CFC)	Potencial de depleção do ozônio	Converte os dados do ICV em triclorofluormetano (CFC-11) equivalente
	Hidroclorofluorcarbono (HCFC)		
Acidificação	Óxidos de enxofre (SO _x)	Potencial de acidificação	Converte os dados do ICV em íon hidrogênio (H ⁺) equivalente
	Ácido clorídrico (HCL)		
	Ácido fluorídrico (HF)		
	Amônia (NH ₄)		

Quadro 8 – Exemplos de categorias de impacto e fatores de caracterização

Fonte: Adaptado de Curran (2006)

Percebe-se a partir do Quadro 7 que um mesmo item do inventário pode ser classificado em mais de uma categoria, como é o caso do clorofluorcarbono (CFC), já que contribui tanto para o aquecimento global como para a destruição da camada de ozônio.

No caso da categoria de aquecimento global, exemplificada no Quadro 7, o fator de caracterização transforma todos os gases para uma quantidade equivalente

de CO₂. O fator de caracterização, nesse caso, representa o potencial de aquecimento global de cada gás em relação ao CO₂ (GUINÉE *et al.*, 2001). O fator de caracterização para o metano (CH₄) é igual a 25 (IPCC, 2007)³⁴. Em outras palavras, o metano possui um potencial de aquecimento global 25 vezes superior ao dióxido de carbono (CO₂), logo, a quantidade de CH₄ deve ser multiplicada por 25. Ainda com relação ao aquecimento global, o N₂O apresenta um fator de caracterização de 298 (IPCC, 2007).

Já para a categoria destruição da camada de ozônio, um exemplo é o gás HCFC-114, que apresenta fator de caracterização igual a 0,012. Isso significa que ele possui apenas 1,2% do potencial de destruição do ozônio em comparação à substância de referência dessa categoria, que é o CFC-11 (GUINÉE *et al.*, 2001).

Os demais elementos da fase de AICV, mostrados na Figura 24, são opcionais: normalização, agrupamento, ponderação e análise da qualidade dos dados.

A normalização transforma o resultado de um indicador de categoria dividindo-o por um valor de referência. Alguns exemplos de valores de referência são as emissões ou uso de recursos totais para uma dada área que pode ser global, nacional, regional, ou local (ABNT, 2006b). Outra forma é adotar uma base per capita (CURRAN, 2006).

O objetivo da normalização é entender melhor a magnitude relativa de cada indicador do sistema de produto em estudo. Além disso, como cada indicador passa a ser adimensional após a normalização, os dados ficam prontos para procedimentos adicionais, tais como agrupamento e ponderação (ABNT, 2006b). Para Curran (2006), outra utilidade da normalização é que, após esse procedimento, os indicadores de categoria podem ser comparados entre si.

Conforme ABNT (2006b), um aspecto negativo da normalização é que ela pode alterar as conclusões do estudo dependendo das referências adotadas. Diante disso, uma análise de sensibilidade pode fornecer informações sobre o impacto da escolha de dados de referência nos resultados do estudo.

Após a normalização, pode ser feito o agrupamento, cuja finalidade é a reunião de categorias de impacto em um ou mais conjuntos. De acordo com ABNT

³⁴ Os fatores de caracterização para o aquecimento global podem variar dependendo do horizonte de tempo de ação dos gases na atmosfera. Os valores mencionados para o CH₄ e para o N₂O referem-se a um horizonte de tempo de 100 anos (IPCC, 2007). Esse é o horizonte adotado em ACV.

(2006b), há dois procedimentos possíveis. Um deles aconselha agrupar as categorias de impacto em função de características comuns; por exemplo, entradas e saídas, ou escalas espaciais (impactos globais, regionais e locais). O segundo procedimento orienta classificar as categorias por algum tipo de hierarquia, como a prioridade das categorias de impacto (alta, média ou baixa). A hierarquização é, entretanto, baseada em escolha de valores. Diferentes indivíduos ou organizações podem ter preferências diferentes.

Outra etapa opcional é a ponderação, cuja finalidade é a aplicação de um fator numérico representativo da importância relativa de cada categoria de impacto (ABNT, 2006b). As emissões de substâncias nocivas para o ar, por exemplo, podem ser consideradas mais importantes em uma região com elevada poluição atmosférica do que em um lugar com boa qualidade do ar (CURRAN, 2006). Não existe, contudo, base científica para a ponderação nem para o agrupamento dos resultados da ACV a fim de gerar uma pontuação única (ABNT, 2006b).

Por último, conforme ABNT (2006b) pode ser executada uma análise da qualidade dos dados na fase de AICV. Essa etapa visa compreender melhor a significância, incerteza e sensibilidade dos resultados da AICV. As técnicas específicas e seus objetivos estão descritos a seguir:

- a) análise de contribuição: procedimento para identificar os dados que têm a maior contribuição para o resultado do indicador, visando priorizar a tomada de decisão (exemplo: análise de Pareto).
- b) análise de incerteza: procedimento para determinar como as incertezas nos dados e suposições se propagam nos cálculos e como afetam a confiabilidade dos resultados.
- c) análise de sensibilidade: procedimento para determinar como mudanças nos dados e nas escolhas metodológicas afetam os resultados. Pode ser útil, por exemplo, para avaliar as escolhas feitas dentro da normalização e da ponderação.

(d) Interpretação

A interpretação do ciclo de vida visa fornecer, de maneira consistente com o objetivo e escopo do estudo, uma apresentação completa dos resultados, conclusões e recomendações aos tomadores de decisão (ABNT, 2006a).

Na fase de interpretação do ciclo de vida de um estudo de ACV ou ICV, dois elementos devem ser considerados: identificação das questões mais importantes, de acordo com o objetivo do estudo, e avaliação do grau de confiabilidade dos resultados, considerando suposições e métodos adotados, sobretudo nas questões mais relevantes identificadas anteriormente (ABNT, 2006b). Caso sejam constatados problemas, a natureza iterativa da ACV permite que os pontos fracos do estudo sejam corrigidos ou, se isso não for possível, que o objetivo seja alterado.

Durante a avaliação, três procedimentos devem ser considerados (ABNT, 2006b):

- a) verificação de completeza: visa assegurar que todas as informações relevantes e os dados necessários para a interpretação estejam disponíveis e completos;
- b) verificação de sensibilidade: tem o objetivo de determinar de que forma os resultados são afetados por incertezas nos dados e métodos adotados;
- c) verificação de consistência: visa determinar se os pressupostos, métodos e dados são consistentes com o objetivo e escopo.

Finalmente, deve-se identificar as limitações do estudo, fornecer conclusões e fazer recomendações para o público alvo da ACV.

APÊNDICE C – ANÁLISE ECONÔMICA EM ACV CONSEQUENCIAL

A abordagem consequencial em ACV necessita de ferramentas de análise do mercado a fim de determinar as consequências de mudanças. De acordo com Ekvall (2002), Ekvall *et al.* (2004), Zamagni *et al.* (2008), alguns conceitos da área de ciências econômicas são úteis para essa finalidade. São eles: modelos de equilíbrio parcial, modelos de equilíbrio geral, curvas de aprendizagem e efeito rebote (também conhecido como efeito ricochete ou efeito bumerangue).

(a) Modelos econômicos de equilíbrio parcial

A demanda por um produto depende da renda, da preferência dos consumidores e do preço desse produto. A partir daí, pode ser determinada uma curva de demanda, cuja finalidade é a representação da utilidade marginal decrescente do produto. Isso significa que quanto maior a quantidade consumida, menor será a utilidade que uma unidade adicional proporciona e, por conseguinte, menor será o preço que o consumidor estará disposto a pagar por essa unidade adicional (MOTTA, 2006).

De maneira similar à demanda, é possível estabelecer uma curva de oferta para determinado produto. A curva de oferta apresenta as quantidades que os fornecedores estão dispostos a oferecer em função do preço. Nesse caso, a inclinação da curva é positiva, visto que quanto maiores os preços, maior será a disposição em produzir (PINDYCK; RUBINFELD, 2005). Ambas as curvas são ilustradas na Figura 25.

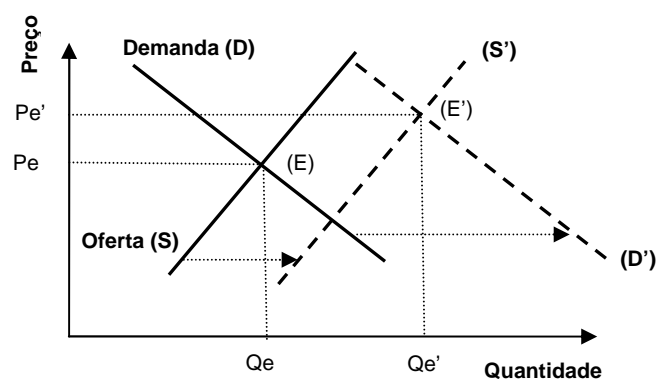


Figura 25 – Equilíbrio de mercado

Fonte: Adaptado de Motta (2006)

O ponto de equilíbrio (E) é determinado pela interseção entre as curvas de oferta e de demanda, como mostrado na Figura 25. Esse ponto representa a condição na qual a oferta é igual à demanda (SANDRONI, 2005). A teoria econômica afirma que o mercado tende naturalmente ao equilíbrio (MOTTA, 2006).

Considerando as curvas D e S na Figura 25, é possível ilustrar duas situações de desequilíbrio: preço maior ou preço menor que o valor de equilíbrio (P_e). A preços maiores que o preço de equilíbrio (P_e), os fornecedores estão dispostos a produzir mais. Em contrapartida, os consumidores estão dispostos a consumir menos, o que causa um excesso de oferta. O excesso de oferta estimula a queda do preço, que retorna ao equilíbrio (P_e). Por outro lado, caso os preços sejam menores que o preço de equilíbrio (P_e), a situação se inverte. A demanda aumenta, mas a quantidade que os produtores estão dispostos a oferecer cai, gerando uma situação de escassez. A escassez leva a um aumento de preço, o qual retorna ao equilíbrio (P_e). É importante ressaltar que nessas duas situações de desequilíbrio analisadas, apenas o preço se altera; todas as demais condições do mercado permanecem constantes, como renda, custos de produção, etc. Em outras palavras, há deslocamentos ao longo das curvas, mas não deslocamentos das curvas (PINDYCK; RUBINFELD, 2005).

O equilíbrio se altera (ponto E') quando as curvas de oferta e demanda se deslocam. A curva de demanda se desloca para a direita (D') se houver, por exemplo, um aumento na renda do consumidor ou um aumento no preço de um produto substituto, e se desloca para a esquerda quando houver desestímulo ao consumo. A curva de oferta, por sua vez, se desloca para a direita (S') no caso, por exemplo, de queda dos custos ou mudanças tecnológicas. Caso os custos aumentem, a curva se desloca para a esquerda (MOTTA, 2006).

Muitas vezes há a necessidade de determinar quantitativamente as reações do mercado às mudanças na oferta, na demanda, no preço, etc. Para isso, são usadas as elasticidades, que medem quanto uma variável pode ser afetada por outra (PINDYCK; RUBINFELD, 2005). A elasticidade informa a variação percentual que ocorrerá em uma variável como reação ao aumento de um ponto percentual em outra variável. Quanto mais inclinada é a curva, menor é a elasticidade. De acordo com os mesmos autores, é bastante comum o uso de duas elasticidades em estudos econômicos: elasticidade de preço da demanda e elasticidade de preço da oferta.

Como os próprios nomes sugerem, a primeira relaciona preço e demanda e a segunda relaciona preço e oferta.

A elasticidade pode ser expressa, genericamente, como mostrado pela equação (2).

$$\varepsilon = (\% \Delta Q) / (\% \Delta P) \quad (2)$$

onde:

ε é a elasticidade de preço da oferta (ou da demanda)

$\% \Delta Q$ é a variação percentual da quantidade

$\% \Delta P$ é a variação percentual do preço

A Figura 26 apresenta dois casos especiais, conhecidos como perfeita elasticidade e perfeita inelasticidade.

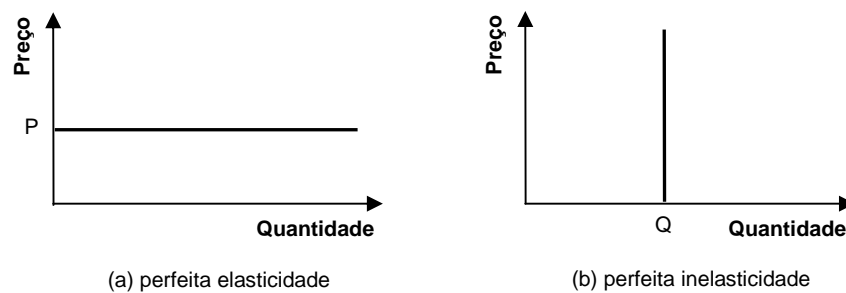


Figura 26 – Perfeita elasticidade e perfeita inelasticidade

Fonte: Adaptado de Pindyck e Rubinfeld (2005)

A Figura 26a apresenta o caso de perfeita elasticidade. Quando a demanda é perfeitamente elástica, os consumidores estão dispostos a adquirir qualquer quantidade, desde que o preço não ultrapasse um determinado valor (P). No caso de oferta perfeitamente elástica, o mercado será atendido, sem restrições, em qualquer quantidade, a um preço determinado.

A Figura 26b ilustra uma situação de perfeita inelasticidade. Uma demanda perfeitamente inelástica significa que os consumidores continuarão comprando a mesma quantidade (Q), independentemente do preço. Por fim, uma oferta perfeitamente inelástica indica que o preço não interfere na quantidade que será produzida.

As elasticidades de preço dependem fortemente do horizonte de tempo do estudo. Em geral, a elasticidade é maior (menor inclinação da curva) em uma perspectiva de longo prazo³⁵ porque, nesse caso, os produtores dispõem de tempo para se adaptar às mudanças. Valores para elasticidade são geralmente identificados por meio de séries temporais e modelos econométricos³⁶ (EKVALL; WEIDEMA, 2004).

Modelos de equilíbrio parcial estudam o comportamento de um mercado e fazem uso dos conceitos abordados acima. Quando se determina os preços e as quantidades de equilíbrio usando esse tipo de modelo, presume-se, entretanto, que a atividade no mercado³⁷ em questão não afeta outros mercados (PINDYCK; RUBINFELD, 2005). O equilíbrio parcial trabalha, portanto, com dados restritos (SANDRONI, 2005).

Estudos atribucionais de ACV se baseiam na suposição de que um aumento na demanda do produto investigado leva automaticamente ao aumento da oferta na mesma quantidade, sem outras conseqüências no mercado. Esse procedimento, tradicional em inventários de ciclo de vida, baseia-se na hipótese do mercado perfeitamente competitivo³⁸ de longo prazo. Essa premissa resulta numa oferta perfeitamente elástica, de modo que um aumento na demanda não altera o preço. Em síntese, o mercado não é afetado pela demanda.

Na realidade, pode haver diversos tipos de restrições na produção. Dessa maneira, a oferta não será perfeitamente elástica, principalmente no curto prazo, e

³⁵ Conforme a teoria econômica, longo prazo é o tempo necessário para que as quantidades de todos os fatores de produção (trabalho, capital e matérias-primas) possam se tornar variáveis. Curto prazo é o período em que as quantidades de um ou mais fatores de produção não podem ser modificadas (PINDYCK; RUBINFELD, 2005).

³⁶ A econometria é o ramo da economia que busca exprimir, por meio de dados estatísticos e modelos matemáticos, as leis econômicas anteriormente formuladas; tem o objetivo de orientar políticas econômicas (SANDRONI, 2005).

³⁷ No sentido econômico, um mercado é um grupo de compradores e vendedores que, por meio de suas interações reais ou potenciais, determinam o preço de um produto ou de um conjunto de produtos correlatos, como, por exemplo, o mercado de computadores pessoais (PINDYCK; RUBINFELD, 2005).

³⁸ De acordo com Brunstein (2005), na situação de mercado denominada concorrência perfeita, fornecedores e compradores são numerosos a tal ponto que nenhum deles, individualmente, tem influência no preço praticado. Além disso, não há diferenciação entre os produtos dos diversos fabricantes. Nesse caso, as empresas são aceitadoras de preços; o preço passa a ser uma variável externa. A situação oposta à concorrência perfeita é o monopólio, situação de mercado em que um fornecedor detém o controle da oferta de um produto para o qual não existe substituto próximo. Como não há concorrentes, o monopolista tem uma posição independente na formulação de preço. Situações intermediárias a esses dois casos extremos são: concorrência monopolística, oligopólio puro e oligopólio diferenciado, as quais não são de interesse no presente trabalho.

uma mudança na demanda poderá ser atendida por um fornecedor alternativo. Isso indica que análises econômicas do mercado são necessárias para estimar corretamente as conseqüências ambientais resultantes da demanda por um produto. Para auxiliar essa análise em estudos de ACV conseqüencial, Ekvall (2002), Ekvall e Weidema (2004) sugerem que modelos econômicos de equilíbrio parcial sejam incorporados aos inventários de ciclo de vida. O uso desses modelos pode, contudo, aumentar a complexidade, as incertezas, os custos e da dificuldade de interpretação dos resultados do estudo. Mais especificamente com relação às elasticidades, é comum haver dificuldade para encontrar valores disponíveis (ZAMAGNI *et al.*, 2008). Quando há disponibilidade de valores empíricos para elasticidades, é comum que se refiram ao curto prazo em razão da maior facilidade de mensuração. Aconselha-se que conseqüências no longo prazo, que envolvam investimentos, sejam determinadas por meio de ferramentas de tomada de decisão de investimentos.

Diante dos desafios impostos pela modelagem econômica, simplificações são necessárias para tornar viável a metodologia conseqüencial de ICV. Uma saída pode ser reduzir o tamanho do sistema investigado, restringindo o estudo às atividades mais afetadas em termos de impactos ambientais (EKVALL; WEIDEMA, 2004; ZAMAGNI *et al.*, 2008). Outra sugestão é o desenvolvimento de diversos cenários, baseados em diferentes suposições (EKVALL; WEIDEMA, 2004).

(b) Modelos econômicos de equilíbrio geral

Os modelos de equilíbrio geral consideram toda a economia, incluindo todas as variáveis relevantes (SANDRONI, 2005) e, da mesma forma que os modelos de equilíbrio parcial, assumem a hipótese de que todos os mercados estão, ou tendem, ao equilíbrio entre oferta e demanda (EKVALL, 2002). A análise de equilíbrio geral é similar à análise de equilíbrio parcial, mas determina os preços e as quantidades em todos os mercados simultaneamente, levando em consideração as inter-relações entre os mercados (PINDYCK E RUBINFELD, 2005).

(c) Curvas de aprendizagem e curvas de experiência

Uma curva de aprendizagem leva em conta o aumento da eficiência de determinada tecnologia decorrente do acúmulo de experiência (WRIGHT³⁹, 1936, *apud* ZAMAGNI *et al.*, 2008). A curva é determinada empiricamente, podendo ser extrapolada para o futuro. Quanto mais imatura é a tecnologia e quanto mais longo o horizonte temporal do estudo, mais relevante é a aplicação das curvas de aprendizagem (ZAMAGNI *et al.*, 2008).

As curvas de experiência possuem significado similar às curvas de aprendizagem, mas relacionam a experiência acumulada com a redução de custos e preços (CLAESON⁴⁰, 2000, *apud* ZAMAGNI *et al.*, 2008). Entretanto, a redução de custos e preços, nesse contexto, é consequência das melhorias na eficiência do produto, de modo que é freqüente o uso do termo “curva de aprendizagem” para se referir a ambos os conceitos (ZAMAGNI *et al.*, 2008).

Esses conceitos podem ser úteis em ACV consequencial, visto que a escolha por determinado produto pode ajudar a desencadear melhorias de eficiência. A melhoria na eficiência do produto pode levar a redução de emissões ou consumo de matéria-prima. Com isso, o desempenho ambiental do produto pode melhorar com o tempo, ou seja, não permanece sempre aquele do momento da aquisição. O aumento da eficiência também pode reduzir custos e, consequentemente, o preço do produto. Desse modo, aumenta a participação de mercado da tecnologia escolhida. Conclui-se, portanto, que a escolha de um produto pode produzir uma cadeia de efeitos derivados da aprendizagem do fabricante (ZAMAGNI *et al.*, 2008).

De acordo com os mesmos autores, o uso dessa ferramenta melhora a exatidão do estudo. Por outro lado, a precisão pode ser reduzida e a complexidade do estudo pode aumentar, assim como seus custos. Além disso, a viabilidade da aplicação depende da disponibilidade de curvas de experiência na literatura.

Zamagni *et al.* (2008) lembram, ainda, que a experiência não é o único fator motivador da melhoria da eficiência e redução de custos. A pesquisa e a transferência de conhecimento entre tecnologias e regiões também contribuem. Portanto, diversos fatores, além da demanda, devem ser considerados, visando

³⁹ WRIGHT, T. P. Factors affecting the costs of airplanes. **Journal of the Aeronautical Sciences**, v. 3, p.122-128, 1936.

⁴⁰ CLAESON, U. **Analyzing technological change using experience curves: a study of the combined cycle gas turbine technology**. Thesis - Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2000.

atribuir corretamente as responsabilidades por impactos. Dito de outra maneira, caso ocorra um desenvolvimento totalmente em razão de transferência de tecnologia, uma eventual melhoria no desempenho ambiental não pode ser atribuída à experiência decorrente da mudança na demanda em estudo.

(d) Efeito rebote

Há evidências históricas de que ganhos de eficiência no uso de energia e minerais não reduzem o consumo. Ao contrário, o mais frequente é que sejam acompanhados de aumentos, porque a economia de recursos financeiros obtidos com a maior eficiência tende a elevar o consumo, mediante investimentos em outras atividades (VEIGA, 2010). Além disso, a queda inicial na demanda, imediatamente após o ganho de eficiência, pode derrubar os preços, incentivando o aumento do consumo (IBENHOLT, 2002). Esse efeito é chamado de “bumerangue”, “ricochete” ou “rebote” (do termo em inglês “*rebound effect*”) (VEIGA, 2010). O efeito rebote é debatido principalmente dentro do setor de energia. Argumenta-se que aumentos na eficiência energética não levam necessariamente a redução do consumo, pelas razões já mencionadas (IBENHOLT, 2002). O efeito rebote é, portanto, o fenômeno no qual a consequência de uma ação é exatamente inversa àquela que se esperava.

É importante observar, contudo, que dependendo da resposta do mercado, o efeito rebote pode reforçar ou reduzir o impacto ambiental do produto. Numa situação, por exemplo, onde ocorre aumento da demanda por energia elétrica em decorrência de uma redução no preço da energia elétrica, haverá aumento do impacto ambiental (EYERER; WOLF⁴¹, 2000; THIESEN⁴² *et al.*, 2007, *apud* ZAMAGNI *et al.*, 2008). Por outro lado, se o dinheiro economizado com a redução de preço do produto for aplicado em alguma melhoria ambientalmente benéfica, por exemplo, em isolamento térmico residencial, o impacto ambiental será reduzido em razão do menor consumo de energia por condicionadores de ar (HERTWICH⁴³, 2005, *apud* ZAMAGNI *et al.*, 2008).

⁴¹ EYERER, P.; WOLF, M. A. Zero Emission: was geht und was nicht. In: ALTNER, G. *et al.* **Jahrbuch Ökologie**, Beck, München: 2000.

⁴² THIESEN, J. *et al.* Rebound Effects of Price Differences. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 2, p. 104-114, 2007.

⁴³ HERTWICH, E. Consumption and the rebound effect: an industrial ecology perspective. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 1-2, p. 85-98, 2005.

O efeito rebote pode ser avaliado por modelos econômicos de equilíbrio geral e modelos econômicos de equilíbrio parcial (IBENHOLT, 2002; ZAMAGNI *et al.*, 2008). De maneira similar às curvas de aprendizagem, a inclusão do efeito rebote torna o estudo consequencial mais abrangente e exato porque colabora na identificação das reais consequências causadas por mudanças. Os aspectos negativos para o estudo são: incremento da complexidade, dos custos e redução da precisão do resultado (ZAMAGNI *et al.*, 2008).

APÊNDICE D – IDENTIFICAÇÃO DO CO-PRODUTO DETERMINANTE EM PROCESSOS MULTIFUNCIONAIS

A análise de processos multifuncionais exige a identificação prévia do co-produto determinante. Para essa identificação devem ser considerados os produtos substitutos e os preços desses substitutos no mercado. Nos casos em que houver produto substituto, esse procedimento leva em conta a premissa geralmente adotada em ACV de que o mercado é perfeitamente competitivo. Dessa maneira, o produtor não consegue influenciar o preço, mesmo diante de um aumento de demanda. Há três situações possíveis:

- a) entre os co-produtos do processo multifuncional, apenas um não possui substituto no mercado: nesse caso, esse é o co-produto determinante, pois, não havendo substituto, uma mudança na sua demanda pode levar a incrementos de preço, tornando-o mais rentável que os demais;
- b) entre os co-produtos do processo multifuncional, mais de um não possui substituto no mercado: os preços dos co-produtos sem substituto se ajustam continuamente para encontrar um ponto onde a demanda absorve completamente a produção. Com isso, esses co-produtos são simultaneamente determinantes para o volume de produção. Uma mudança na demanda para um dos co-produtos determinantes influenciará o volume de produção na proporção da sua participação na margem bruta⁴⁴ do processo multifuncional. Isso significa que apenas uma parte da variação na demanda afeta o processo multifuncional; a parcela restante afeta o fornecedor imediatamente mais sensível no mercado. Esse procedimento deve ser adotado mesmo que o processo multifuncional, como um todo, seja considerado perfeitamente elástico;
- c) todos os co-produtos possuem substituto no mercado: os preços de mercado dos co-produtos são limitados pelos preços dos substitutos, de

⁴⁴ A margem bruta de contribuição de um produto é o resultado da subtração entre a receita bruta, resultante das vendas do produto num determinado período, e o custo variável (matéria-prima, mão de obra, impostos, publicidade, entre outros) associado a essa produção. Quando tratamos de produção conjunta, há custos variáveis que não podem ser atribuídos a nenhum dos co-produtos, já que o processamento é comum. Esses custos, portanto, não entram no cálculo da margem bruta de cada um dos co-produtos. Nessa situação, apenas aqueles custos variáveis que são específicos de cada co-produto devem ser considerados para determinação das suas margens brutas de contribuição individuais (BRUNSTEIN, 2005).

modo que uma mudança na demanda para qualquer dos co-produtos não provoca aumento de preço. Nesse caso, o co-produto determinante para mudança no volume de produção será aquele que:

- fornece uma receita econômica que excede o custo do processo multifuncional; com isso, esse co-produto é, por si mesmo, uma razão para alterar o volume de produção, e
- apresenta uma tendência de mercado (mudança na demanda) maior do que qualquer outro co-produto que satisfaça a primeira condição (levando-se em conta o volume relativo de produção dos co-produtos);

A terceira situação pode ser ilustrada com um exemplo hipotético, como apresentado pela Tabela 7.

Tabela 11 – Identificação do co-produto determinante

Co-produto	Preço do substituto no mercado	Tendência relativa de mercado
A	100	Baixa
B	50	Alta

Fonte: baseado em Weidema e Ekvall (2009)

A Tabela 7 mostra os preços das rotas alternativas de produção dos co-produtos do processo multifuncional e as tendências de mercado para cada um deles. As receitas dos co-produtos do processo multifuncional são iguais aos preços de mercado, tendo em vista que o mercado é perfeitamente competitivo. A seguir três situações distintas serão analisadas com relação a esse exemplo.

Situação 1: o custo de produção do processo multifuncional é menor do que 50. Nessa hipótese, ambos os co-produtos atendem a primeira condição, pois ambos, individualmente, fornecem uma receita maior que o custo para que o processo multifuncional produza. Partindo para a segunda condição, conclui-se que o co-produto determinante é o co-produto B, pois possui maior tendência de mercado.

Situação 2: o custo de produção do processo multifuncional é maior que 50 e menor que 100. O co-produto A é determinante, visto que é o único que satisfaz a primeira condição.

Situação 3: o custo de produção do processo multifuncional é maior que 100 e menor que 150. Nenhum dos co-produtos satisfaz a primeira condição, que é satisfeita somente pela combinação dos dois co-produtos. Em um mercado competitivo, o co-produto com a maior tendência de mercado será vendido ao preço já estabelecido no mercado. Por outro lado, o co-produto de menor tendência de mercado será negociado ao menor preço necessário para vender toda a produção, evitando estocá-la. O preço desse co-produto não pode, contudo, cair abaixo do valor que torne o retorno do processo multifuncional negativo. Assim, quando a primeira condição é satisfeita por meio de uma combinação de co-produtos, será determinante aquele co-produto, pertencente à combinação, que apresente a menor tendência de mercado. Isso ocorre porque é a situação dele que determina se a produção é lucrativa. No exemplo, o co-produto A é o determinante.

Percebe-se, com esse exemplo, que nem sempre o co-produto com maior receita será determinante. Da mesma maneira, nem sempre o co-produto com maior tendência de mercado será determinante.

É interessante ressaltar, também, que o co-produto determinante pode variar ao longo do tempo, dependendo da localização geográfica e da escala da mudança. Sendo assim, é importante estar ciente das condições sob as quais um dado co-produto foi identificado como determinante. Na dúvida, ou quando as condições variam dentro da escala da mudança estudada, do horizonte de tempo e do escopo geográfico do estudo, devem ser estudados diversos cenários.