

## **Hub Internacional para o Desenvolvimento Sustentável**

---

### **AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE**

**Desenvolvimento da metodologia de Avaliação de Sustentabilidade e condução da Avaliação de Sustentabilidade preliminar para criação do Hub Internacional para o Desenvolvimento Sustentável (HIDS)**

**PRODUTO 4 – Princípios baseados na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), através de um modelo de insumo-produto (Economic Input-Output Life Cycle Assessment - EIOLCA)**

**Pablo Dadalti Borba Barroso  
Marcelo Pereira da Cunha  
Clara Martins Leite**

Novembro de 2020

## Equipe – Componente Avaliação de Sustentabilidade

**Coordenação:** Marcelo Cunha – IE Unicamp/DEPI

Adriana Leles – Sanasa  
Adriana Franco Braga – Facamp  
Clara Martins Leite – Consultora BID  
Cláudio Franzolin – PUC-Campinas  
David Montenegro Lapola – CEPAGRI Unicamp  
Eneida Campos – FCM Unicamp  
Fábio Robrigo Fachini – PUC-Campinas  
Giampaolo Pellegrino – Embrapa  
Gustavo Pereira Fraga – FCM Unicamp  
Jose M. de S. Lima Filho – Instituto Eldorado  
Josué Mastrodi – PUC-Campinas  
Léa Gejer Struchiner – FEC Unicamp  
Leila da Costa Ferreira – NEPAM Unicamp  
Lizzie Monique Pulgrossi – FEC Unicamp  
Luciano Nass – Embrapa  
Marcelo Morandi – Embrapa  
Márcia Cardelli – Cargill  
Maria Carolina de Barros Grassi – IB Unicamp  
Marília Folegatti – Embrapa  
Maurício Garcia – Sanasa  
Pablo Dadalti – FEM Unicamp  
Patrícia Mariuzzo – Comunicação HIDS  
Patrícia Rinaldi Victal – Facamp  
Rafael Moya Rodrigues Pereira – CPFL  
Ricardo Pannain – PUC-Campinas  
Simone Pereira de Souza – FEM Unicamp  
Thalita Dalbello – DEPI Unicamp  
Vanderlei Braga – DEPI Unicamp  
Vanessa Gomes da Silva – FEC Unicamp  
Victor Deantoni – PUC-Campinas

## Sumário

<b>Equipe – Componente Avaliação de Sustentabilidade</b> .....	2
<b>1. Introdução</b> .....	4
<b>2. Avaliação de Ciclo de Vida (“Process Life Cycle Assessment – LCA).....</b>	5
<b>3. Metodologia de Insumo-Produto (“Environmental Input-Output Life Cycle Assessment” – EIO-LCA) .....</b>	8
<b>4. Modelo híbrido de Ciclo de Vida .....</b>	12
<b>5. Referências .....</b>	14

## 1. Introdução

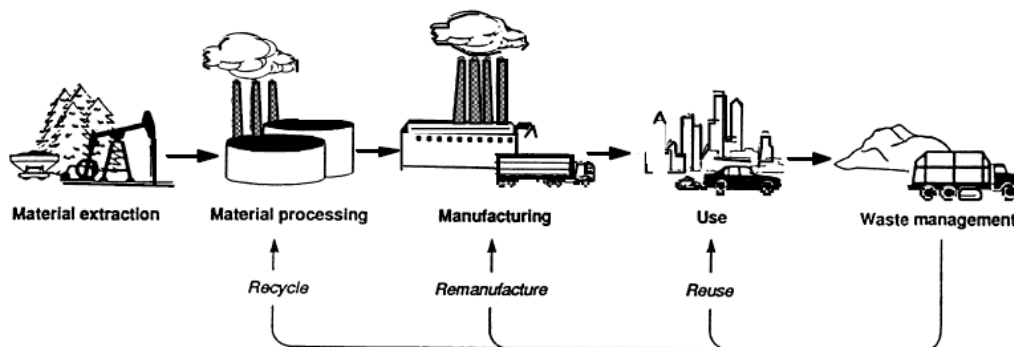
Neste relatório, é realizada uma descrição sucinta dos princípios da Análise de Ciclo de Vida (*“Process Life Cycle Assessment – LCA”*) e da metodologia de Insumo-Produto utilizada para análise de impactos socioeconômicos e ambientais (*“Environmental Input-Output Life Cycle Assessment” – EIO-LCA*), duas metodologias que estão sendo implementadas como parte da plataforma de avaliação de sustentabilidade do HUB Internacional para o Desenvolvimento Sustentável (HIDS).

Na próxima seção são expostos os conceitos da ACV (elaborada através da metodologia de processos), na seção 2 os princípios da Análise de Insumo-Produto aplicada à avaliação do ciclo de vida (EIO-LCA) e, na última seção, é apresentada uma comparação das duas metodologias, explicitando a potencial delas se complementarem de maneira a ter uma avaliação mais completa e otimizada. As descrições apresentadas são fundamentadas, principalmente, em Hendrickson, Lave e Matthews (2006).

## 2. Avaliação de Ciclo de Vida (“Process Life Cycle Assessment – LCA”)

A Avaliação de Ciclo de Vida é um método internacionalmente padronizado que quantifica os recursos consumidos, as emissões, os impactos ambientais e para a saúde relacionados, bem como os problemas de depleção de recursos que estão associados a algum produto – bem ou serviço. Para isso, a metodologia leva em consideração todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição da matéria-prima, passando pela sua produção, uso, reciclagem e descarte de resíduos (isto é, “do berço ao túmulo”) (JRC; IES, 2010). A Figura 1 traz uma ilustração do ciclo de vida de um produto. Em geral, as categorias gerais de impactos ambientais que necessitam ser consideradas incluem (i) o uso de recursos, (ii) a saúde humana e (iii) as consequências ecológicas.

**Figura 1 - Esquema do ciclo de vida de um bem**



Fonte: Hendrickson, Lave e Matthews (2006)

De acordo com JRC e IES (2010), a ACV não é um modelo único para identificar as fontes dos complexos problemas ambientais enfrentado atualmente. Isto é, não é um substituto para outros métodos como (i) análise de riscos, (ii) avaliação de impacto ambiental e (iii) análise de custo-benefício. Trata-se de uma valiosa ferramenta de apoio à tomada de decisões, que complementa outros métodos igualmente necessários para ajudar, de maneira eficaz e eficiente, a tornar o consumo e a produção de bens e serviços mais sustentáveis. Dessa maneira, consumidores, empresas, instituições de pesquisa e agências governamentais podem conhecer as implicações de suas escolhas

como, por exemplo, a decisão de usar um novo material, com relação à qualidade ambiental e outras categorias de impacto associadas à avaliação de sustentabilidade.

A série ISO 14040 formaliza a abordagem por processo da Avaliação de Ciclo de Vida e apresenta um guia geral detalhado e abrangente do método. Assim, a norma inclui uma variedade de etapas de processo requeridas para o direcionamento de uma Avaliação de Ciclo de Vida (HENDRICKSON; LAVE; MATTHEWS, 2006). A Tabela 1 apresenta a série ISO 14040.

**Tabela 1 - Normas ISO para Avaliação de Ciclo de Vida**

ISO 14040:1997	Environmental Management – Life Cycle Assessment - Principles and Framework
ISO 14041:1998	Environmental Management – Life Cycle Assessment -Goal and Scope Definition and Inventory
ISO 14042:2000	Environmental Management – Life Cycle Assessment -Life Cycle Impact Assessment
ISO 14043:2000	Environmental Management – Life Cycle Assessment -Life Cycle Interpretation
ISO 14044:2006	Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines

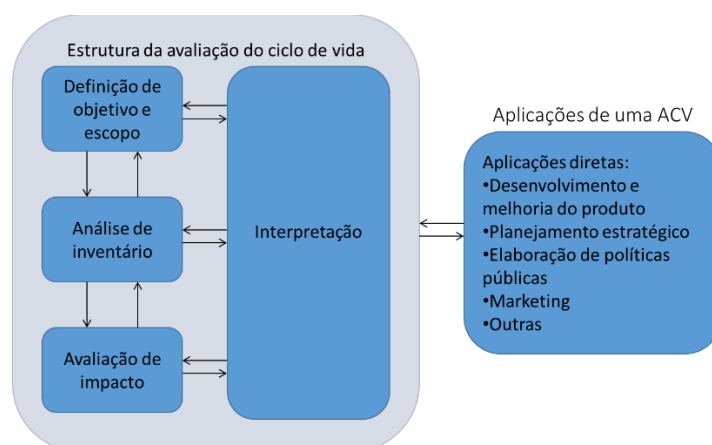
Fonte: Hendrickson, Lave e Matthews (2006)

A metodologia compreende, basicamente, três componentes complementares – Inventário, Impacto e Melhoria – e um procedimento integrativo conhecido como Escopo. Segundo Matthews, Hendrickson e Matthews (2014), consideram-se como principais fases para o desenvolvimento de um a Avaliação de Ciclo de Vida, conforme explicitado na Figura 2:

- **Definição de objetivo e escopo:** Essa fase busca definir e descrever o produto, processo ou atividade que será avaliado, estabelecendo o contexto no qual a avaliação será feita, identificando os limites e efeitos ambientais a serem revistos para a avaliação. Explicita o motivo pelo qual está sendo realizado o estudo, bem como seu alcance.

- **Análise de inventário:** Nessa fase é realizada a coleta, compilação e quantificação dos dados (entradas e saídas de um sistema de produto) necessários para cumprir a meta e o escopo declarados.
- **Avaliação de impacto:** É realizada a análise dos efeitos humanos e ecológicos da utilização de energia, água e materiais e das descargas ambientais identificadas na análise de inventário.
- **Interpretação:** Essa fase valia os resultados e constatações do estudo colocando-os em perspectiva com relação ao objetivo e escopo definidos, buscando chegar a conclusões e recomendações.

**Figura 2 - Fases de uma Avaliação de Ciclo de Vida**



Fonte: ISO 14040 (1997)

A abordagem da Avaliação de Ciclo de Vida pode ser atribucional ou consequencial. A primeira visa descrever os potenciais impactos ambientais que podem ser atribuídos a um sistema ou produto ao longo do seu ciclo de vida, utilizando dados empíricos e inclui todos os processos com contribuição relevante para o sistema estudado. A segunda busca a identificação de consequências de alterações no nível de produção, consumo e descarte de um bem ou serviço, incluindo efeitos internos e externos ao ciclo de vida do estudo, utilizando para isso modelos econômicos que representam relações entre demandas por insumos, elasticidades de preço, oferta e efeitos de mercado. .

De acordo com Hendrickson, Lave e Matthews (2006), a abordagem por processos apresenta como benefício a possibilidade de realizar estudos tão detalhados quanto desejados sobre materiais e balanços de energia. E, como desvantagem, os custos financeiros e de tempo significativos, devido à enorme quantidade de dados requeridos

para desenvolver o estudo e que levam, ainda, à necessidade de estabelecer, de forma estreita, as fronteiras do sistema a ser analisado, excluindo da avaliação outras fases do processo nos demais elos da cadeia produtiva que foram excluídos da fronteira estabelecida anteriormente.

### 3. Metodologia de Insumo-Produto (“Environmental Input-Output Life Cycle Assessment” – EIO-LCA)

Outra abordagem empregada para a avaliação do ciclo de vida é através da técnica de insumo-produto. Essa abordagem pode ser pensada como “*top-down*”, pois leva a uma estimativa abrangente do recurso necessário para a produção de um bem ou serviço de uma economia.

Uma análise de insumo-produto permite mensurar aspectos socioeconômicos (como nível da produção setorial, geração de riqueza (incluindo a mensuração do Produto Interno Bruto – PIB), geração de empregos, entre outros) e aspectos ambientais (como emissões de gases causadores do efeito estufa, uso da água, uso de recursos energéticos, uso de recursos minerais, entre outros) que estão “incorporados” na oferta de um produto (bem ou serviço) em qualquer economia, levando-se em consideração todos os efeitos diretos e indiretos associados à sua cadeia produtiva. Para realizar tal análise, a base de dados principal diz respeito à matriz de insumo-produto da região (economia) onde a cadeia produtiva do produto de interesse está instalada.

A Análise de Insumo-Produto foi proposta e formulada pelo economista russo – e radicado nos Estados Unidos desde os anos 1930 – Wassily Leontief, ganhador do prêmio Nobel de Economia em 1973 justamente por suas contribuições na Análise de Insumo-Produto (MILLER e BLAIR, 2009). O Modelo de Insumo-Produto foi proposto inicialmente por Leontief na década de 1920, no ambiente das economias planificadas. Entretanto, o primeiro trabalho aplicado com esta ferramenta é publicado por Leontief em 1941 para o estudo da economia norte-americana referente ao período compreendido entre 1919 a 1929 (LEONTIEF, 1941).

Do ponto de vista matemático, trata-se de um modelo linear, o que o tornou factível de ser implementado computacionalmente antes dos modelos de equilíbrio geral, que são não-lineares e mais complexos. A partir do trabalho pioneiro de Leontief, do aperfeiçoamento de banco de dados sobre as atividades produtivas em diversos países e com o desenvolvimento dos computadores, o uso da Análise de Insumo-Produto se



propagou de forma significativa no início dos anos 1950 em várias áreas de economia aplicada. Por exemplo, o próprio Leontief publicou estudos relacionando aspectos ambientais e a estrutura econômica (Leontief, 1970) e sobre mudanças tecnológicas com a matriz de insumo-produto (Leontief, 1989).

Um modelo de insumo-produto traz a representação dos vários insumos necessários para produzir uma unidade monetária de um produto para cada setor de uma economia usando-se os dados obtidos do sistema de contas nacionais de um país. Através da elaboração de uma tabela (chamada de tabela de transações) descrevendo todos os maiores setores da economia, é possível rastrear todas as compras necessárias para produzir produtos em cada setor, desde o início de sua cadeia produtiva, a partir das matérias-primas que são extraídas (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014). A estrutura da tabela de transações de uma matriz de insumo-produto pode ser vista na Figura 3. Cada elemento  $Z_{ij}$ , denominado como consumo intermediário, representa o insumo consumido pelo setor  $j$  com origem no setor  $i$  em valor monetário. Ainda na Figura 3,  $X_i$  representa o valor da produção total do setor  $i$  e  $Y_i$  representa a demanda final (composta pelo (i) consumo das famílias, (ii) consumo do governo, (iii) exportações e (iv) formação bruta de capital) pelo setor  $i$ . Considerando-se uma economia com  $n$  setores produtivos (ou atividades produtivas), a produção total  $X_i$  é a soma do consumo intermediário relativo ao produto  $i$  ( $Z_{i1} + Z_{i2} + \dots + Z_{in}$ ) com a demanda final por produtos desse setor ( $Y_i$ ).

**Figura 3 - Estrutura da tabela de transações de uma matriz de insumo-produto**

	Input to sectors				Intermediate output $O$	Final demand $Y$	Total output $X$
Output from sectors	1	2	3	$n$			
1	$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{13}$	$Z_{1n}$	$O_1$	$Y_1$	$X_1$
2	$Z_{21}$	$Z_{22}$	$Z_{23}$	$Z_{2n}$	$O_2$	$Y_2$	$X_2$
3	$Z_{31}$	$Z_{32}$	$Z_{33}$	$Z_{3n}$	$O_3$	$Y_3$	$X_3$
$n$	$Z_{n1}$	$Z_{n2}$	$Z_{n3}$	$Z_{nn}$	$O_n$	$Y_n$	$X_n$
Intermediate input $I$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_n$			
Value added $V$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_n$		GDP	
Total output $X$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_n$			

Fonte: Miller e Blair (2009)

A partir da tabela de transações (que é a principal tabela de uma matriz de insumo-produto), obtém-se o que se conhece como matriz de coeficientes técnicos diretos de produção (matriz **A**), representando as proporções de insumos intersetoriais da economia, através da divisão de  $Z_{ij}$  por  $X_j$  (ou seja, o valor dos insumos que o setor  $j$  – identificado na coluna  $j$  da tabela de transações – usa do setor  $i$  – identificado na linha  $i$  da tabela de transações -, dividido pelo valor da produção do setor  $j$ ). As linhas de **A** representam o montante de produtos da indústria  $i$  necessário para produzir uma unidade monetária de produtos da indústria  $j$  – identificada na coluna  $j$ . Algebricamente, a produção total da economia necessária para atender à demanda final por produtos de todos os setores é dada por:

$$\begin{aligned} X &= [Y + A.Y + A.(A.Y) + A.(A.(A.Y)) + \dots] = \\ &= [I + A + A^2 + A^3 + \dots]Y = (I - A)^{-1}Y \quad (1) \end{aligned}$$

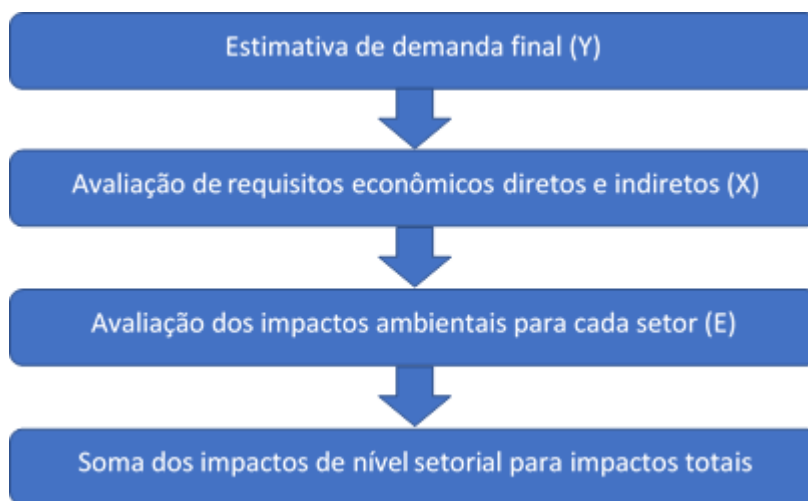
Na equação (1), o termo **Y** representa a produção dos produtos demandados, **A.Y** representa a produção dos insumos diretos necessários, **A<sup>2</sup>.Y** representa a produção do primeiro ciclo dos insumos indiretos, ou seja, insumos dos insumos e, assim, sucessivamente. Deste modo, a soma de todos os tempos incorpora o nível de produção necessário em todos os setores da economia, considerando-se todos os ciclos de efeitos diretos e indiretos da cadeia produtiva, para atender a demanda da produção de um produto (bem ou serviço). Na análise de ciclo de vida realizada através da técnica de insumo-produto (EIO/LCA), o vetor **X** de produção é multiplicado por coeficientes técnicos de impacto ambiental médio ou pelos coeficientes técnicos de recursos requeridos por cada setor, sendo a soma desses impactos individuais o impacto total da cadeia produtiva associada à produção do produto estudado. A equação (2) apresenta, algebricamente, o cálculo do vetor **B** de recursos necessários totais, em cada setor, para atender a uma demanda por produtos **Y**, obtido pela multiplicação da matriz diagonalizada ( $\hat{R}$ ) – obtida do vetor **R**, de coeficientes de recursos necessários – pelo vetor da produção total (vetor **X**).

$$B = \hat{R}.X = \hat{R}.(I - A)^{-1}Y \quad (2)$$

De acordo com Hendrickson, Lave e Matthews (2006), as etapas básicas para a utilização de tal metodologia são quatro e estão descritas na Figura 4. Primeiramente, uma aquisição associada a um produto ou processo é identificada. Essa aquisição é utilizada como um produto desejado no modelo de insumo-produto. Uma vez que a compra é especificada, toda sua cadeia de suprimento é estimada, desde a extração das matérias-primas, até outros componentes (insumos). O modelo, então, calcula as descargas ambientais resultantes da aquisição de um produto e de toda sua cadeia

produtiva. O processo de identificar aquisições continua até que todas as fases de fabricação, uso e descarte de um produto estejam representadas (HENDRICKSON; LAVE; MATTHEWS, 2006).

**Figura 4 - Etapas da EIOLCA**



Fonte: Hendrickson, Lave e Matthews (2006)

A vantagem de se utilizar um modelo de insumo-produto para a avaliação de ciclo de vida é que nenhuma fronteira necessita ser definida, pois a técnica de insumo-produto considera os efeitos (diretos e indiretos) em toda a cadeia produtiva, incluindo todos os materiais, recursos ambientais e energia necessários para a produção de um bem ou serviço, sendo ainda um estudo rápido de ser realizado e de baixo custo. Por outro lado, a desvantagem da utilização dessa técnica reside no nível de agregação mais elevado que se encontram os dados para a sua realização, ao invés de dados detalhados para um específico de processo – como é feito, tipicamente, em uma ACV de processo.

## 4. Modelo híbrido de Ciclo de Vida

Considerando as duas técnicas explicitadas nas seções 1 e 2 e suas respectivas vantagens e desvantagens, o uso combinado delas poder ser realizado de maneira a extrair a vantagem de ambas. Essa abordagem faz parte estratégia planejada para a elaboração da plataforma de avaliação de sustentabilidade do HIDS. A Tabela 2 mostra as vantagens e desvantagens de ambas as metodologias.

**Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das abordagens da ACV por processo (Process LCA) e por insumo-produto (EIOLCA)**

	Process LCA	EIOLCA
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise detalhada de processo específico</li> <li>• Comparação entre produtos específicos</li> <li>• Melhorias de processo, análise de ponto fraco</li> <li>• Avaliação de desenvolvimento de produtos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abordagem ampla da economia, avaliações compreensivas (todos os efeitos ambientais diretos e indiretos são incluídos)</li> <li>• Sistema de ACV: Indústrias, produtos, serviços, economia nacional</li> <li>• Análise de sensibilidade e planejamento de cenários</li> <li>• Disponibilidade de dados públicos, resultados reprodutíveis</li> <li>• Avaliação de desenvolvimento de produtos</li> <li>• Informação em cada mercadoria da economia.</li> </ul>
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escolha de fronteira do sistema de maneira subjetiva</li> <li>• Tem alto custo e leva muito tempo para ser feita</li> <li>• Dificuldade de projetar novos processos</li> <li>• Uso de dados privados</li> <li>• Não pode ser replicado se dados confidenciais forem utilizados</li> <li>• Incerteza nos dados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algumas avaliações de produto contêm dados muito agregados</li> <li>• Dificuldade de avaliação de processo</li> <li>• Dificuldade em conectar valores monetários com unidades físicas</li> <li>• Dados econômicos e ambientais podem refletir práticas passadas</li> <li>• Dificuldades para ser aplicado para uma economia aberta</li> <li>• Incerteza nos dados</li> </ul>

Fonte: Hendrickson, Lave e Matthews (2006)

Com o propósito de combinar as melhores características das duas abordagens, um Modelo Híbrido pode ser desenvolvido. Em geral, esse tipo de modelo utiliza como núcleo principal um modelo baseado no processo ou um modelo baseado em insumo-produto, usando elementos da outra abordagem para estender a utilidade da avaliação do ciclo de vida como um todo (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014).

Em Matthews, Hendrickson e Matthews (2014), são explicitados três categorias de modelos híbridos: Análise híbrida em camadas, Análise híbrida baseada em insumo-produto e modelos híbridos integrados.

**A análise híbrida em camadas** utiliza dados de processos específicos para modelar componentes chave do sistema de produto (efeitos diretos e de “*downstream*” como fase de uso ou fim de vida de um produto) e uma análise através de insumo-produto para as demais componentes do sistema estudado. A fronteira entre a abordagem de processo e de insumo-produto é arbitrária, sendo definida pela disponibilidade de recursos e dados.

**A análise híbrida baseada em insumo-produto** busca desagregar os setores do modelo de insumo-produto em múltiplos setores através da disponibilidade de dados da ACV de processo. Nesse tipo de modelo, dados obtidos de uma ACV de processos trazem a possibilidade de modificar valores nas linhas ou colunas da matriz de insumo-produto, alocando seus valores em um setor existente ou a ser desagregado.

Finalmente, o **modelo híbrido integrado** é aquele que utiliza uma matriz tecnológica que representa fluxos físicos entre processos e uma matriz de insumo-produto que traz os fluxos monetários de insumos entre os setores. Ambos, fluxos físicos e monetários, nesse tipo de modelo, usam a estrutura de um modelo de insumo-produto.

## 5. Referências

HENDRICKSON, C. T.; LAVE, L. B.; MATTHEWS, H. S. **Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach**. 1. ed. Whashington: Resources for the future, 2006.

JRC; IES. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. First edit ed. Luxembourg: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010.

LEONTIEF, W. **The Structure of American Economy, 1919-1939**. New York: Oxford University Press. 1941.

LEONTIEF, W. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach, **Review of Economics and Statistics**, **52**, 262-271. 1970.

LEONTIEF, W. Input-output data base for analysis of technological change. **Economic Systems Research** 1 (3) 287–295. 1989.

MATTHEWS, H. S.; HENDRICKSON, C. T.; MATTHEWS, D. H. **Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions thta Matter**. 1. ed. [s.l.] Open Access Textbook, 2014.

MILLER, R. E.; and BLAIR, P. D. **Input-Output Analysis: Foundations and Extensions**. Second edition. Cambridge, GBR: Cambridge University Press. 2009.