



Recomendação de métodos de contabilização de recursos

José Adolfo de Almeida Neto¹, Ittana de Oliveira Lins¹, Rodrigo A. F. Alvarenga²

¹Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

²Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

Resumo. Recursos naturais são essenciais para a sociedade, para diferentes usos, como serviços de regulação e de provisão. Visando sua proteção, diversas metodologias de avaliação ambiental vêm sendo desenvolvidas, como a Emergia e a Pegada Ecológica, podendo ser usadas em diferentes escalas, desde um produto até um país ou região. Por outro lado, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é considerada umas das ferramentas mais interessantes para avaliação ambiental de produtos. Recursos naturais podem ser avaliados de duas maneiras na ACV: (a) como entradas de processos agrícolas ou industriais, da produção de um determinado produto (final ou intermediário), sendo analisados na etapa de inventário do ciclo de vida (ICV); (b) ou como uma área de proteção (AoP), na avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV), ou seja, ao considerar o ciclo de vida de um produto, um dos impactos analisado é o dano aos recursos naturais. Neste contexto, diversas metodologias ad hoc de avaliação ambiental sendo adaptadas como métodos de AICV, podendo ser denominados de métodos de contabilização de recursos (RAM). Estes RAM geralmente consideram características que diferentes recursos têm em comum (p.ex. valor exergético), para criar fatores de caracterização (FC) e, poder quantificar impactos ambientais em indicador único. Atualmente existem na literatura diversos RAM operacionais para AICV, sendo o objetivo deste trabalho avaliar qual(is) o(s) mais recomendado(s) para o contexto brasileiro. Avaliaram-se oito métodos, utilizando dois critérios (robustez científica e escopo, onde se incluiu a regionalização). O RAM recomendado foi o ICEC/ECEC para estudos que utilizem base de dados (ICV) com abordagem econômica do tipo extended input-output e o CEENE v2.0 quando for utilizado o process-based ICV ou uma abordagem híbrida, neste caso, com possibilidade de ser utilizado o método Demanda Solar de Energia (SED) como método complementar. Os RAM apresentam uma abordagem mais simplificada, por estarem muito próximo do ICV nas relações de causa-efeito dos impactos. Porém, apresentam menor incerteza quando comparados com outros métodos de AICV, que tratam de depleção de recursos. Além disso, estes métodos de depleção de recursos (bióticos e abióticos) ainda não estão consolidados na comunidade de ACV, fazendo com que os RAM se tornem alternativas interessantes para avaliação de impactos na AoP Recursos.

Palavras-chave. Recursos; Métodos; Recomendação; AICV; Brasil.

Introdução

Uma das etapas da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), responsável pela avaliação dos impactos ambientais associada à diferentes categorias de impacto, é denominada Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) (ISO, 2006).

O impulso no desenvolvimento da ACV no Brasil nos últimos 10 anos foi significativo, com grande crescimento de ações no meio acadêmico, com eventos científicos bianuais regulares desde 2008, no meio empresarial por meio da constituição da Rede Empresarial Brasileira de ACV a partir de 2012, e, no público por meio da instituição do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV), a partir de 2011, reunindo os diferentes atores em ações de fortalecimento da ACV como ferramenta de apoio à gestão ambiental.

O PBACV funciona com cinco comissões técnicas, sendo a terceira em Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), com o objetivo principal de regionalização de métodos de AICV para o contexto brasileiro (CONMETRO, 2011).

Neste contexto, um grupo de pesquisadores ligados a diversas universidades e centros de pesquisa do Brasil formalizou durante o Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida, em 2014, a Rede de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida (RAICV), tendo como um dos seus objetivos a análise crítica e recomendação dos métodos de AICV mais apropriados ao contexto nacional.

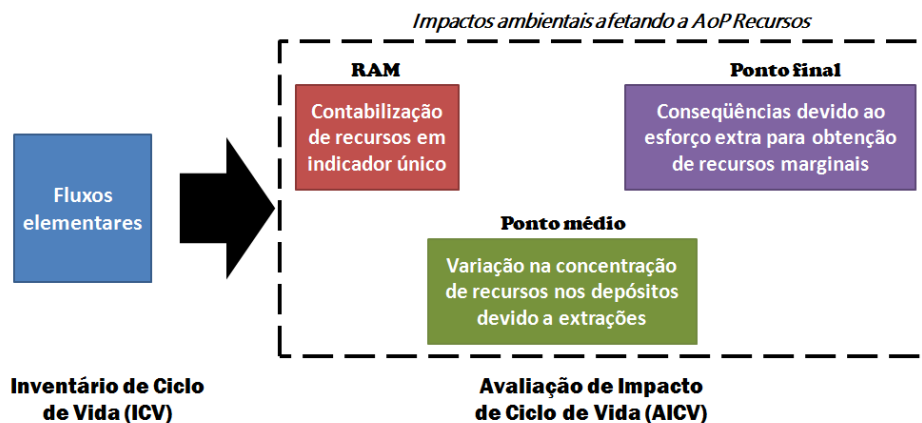
O trabalho tem sido conduzido para diversas categorias de impacto ambiental, com destaque para Acidificação, Eutrofização, Toxicidade, Pegada hídrica, Uso do solo e Consumo de recursos naturais. Com relação a recursos naturais, duas abordagens são consideradas em ACV: São considerados entradas dos processos industriais,

necessárias para a produção de determinado produto (intermediário ou final), sendo neste caso, analisados no inventário de ciclo de vida (ICV); e por outro, são considerados como uma área de proteção (AoP), e são incluídos como uma categoria própria de impacto ambiental, sendo avaliado por meio de métodos próprios na etapa de AICV. Os métodos de AICV, em geral, avaliam o impacto ambiental, utilizando fatores de caracterização (FC) associados a modelos.

Os recursos naturais podem ser classificados sob diferentes perspectivas, como: (1) renováveis ou não-renováveis; (2) depósitos, reservas ou fluxos e (3) abióticos ou biótico (Swart et al., 2015). Considerando a última classificação, define-se: recursos bióticos como sendo todas aquelas matérias-primas derivadas de organismos vivos (p.ex. carvão vegetal), enquanto os recursos abióticos são materiais oriundos de processos biológicos do passado (p. ex. carvão mineral) ou processos físico-químicos (p. ex., minério de ferro).

De acordo com uma das classificações reconhecida pela comunidade científica (Figura 1), os métodos de AICV par a avaliar a categoria recursos podem ser divididos em três grupos: (1) de contabilização de recursos (*Resource Accounting Methods* - RAM); (2) de ponto médio (*midpoint*); e (3) de ponto final (*endpoint*) (ILCD, 2011; Swart et al., 2015).

Figura 1: Representação simplificada da relação causa-efeito dos impactos na AoP Recursos, segundo classificação tradicional proposta por ILCD (2011) e Swart et al. (2015)



Os métodos de AICV do tipo RAM avaliam a categoria de impacto “Recursos” num nível inicial, ou seja, próximo do ICV. Estes métodos geralmente contabilizam os recursos usados e consumidos ao longo do ciclo de vida de um produto e computados no ICV, na forma de indicadores únicos, como exergia, energia ou massa. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise crítica de métodos e modelos para contabilização de recursos (RAM).

Materiais e Métodos

Esta pesquisa pode ser classificada como exploratória, aplica, com abordagem quantitativa e qualitativa, realizada por meio de pesquisa bibliográfica e documental, adotando o método dedutivo (Koche, 1997; Lakatos e Marconi, 1993).

Para levantar o estado da arte dos métodos e modelos de AICV, relacionados à categoria de impacto “recursos”, adotou-se o levantamento bibliográfico de documentos disponíveis no Portal de Periódicos da Capes, no período de 01 de janeiro de 1994 a dezembro de 2014, bem como, artigos, manuais e documentação associados a métodos de AICV disponíveis na web e reconhecidos pela comunidade científica, utilizando de forma isolada ou em associação, palavras chaves referentes à ACV e à AoP recursos, com foco nos métodos e modelos tipo RAM.

A análise crítica e avaliação dos métodos e modelos de caracterização foram realizadas com base numa matriz de critérios validada por um grupo de especialistas da Rede de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (RAICV). Os critérios utilizados foram: escopo, robustez científica, possuir FC regionalizados e possibilidade de regionalização de FC. No caso específico dos métodos e modelos classificados no grupo RAMo terceiro e

quarto critérios foram desconsiderados e a disponibilidade de FC regionalizados foi avaliada conjuntamente com o critério escopo.

Portanto, nesta pesquisa foram avaliados dois critérios: (1) Escopo (incluindo o número de FC); e (2) Robustez científica do método / modelo. A partir da avaliação qualitativa dos métodos /modelos para cada um dos critérios e da avaliação quantitativa com base na ponderação de valores dos critérios qualitativos pré-estabelecidos, foi recomendado o método com as melhores pontuações para o contexto nacional. As avaliações qualitativas receberam notas entre 1 (mais baixa) e 5 (mais alta), justificadas com base nos argumentos técnicos e consenso entre os autores.

Resultados de Discussão

Foram identificados vários métodos de contabilização de recursos na literatura em nível de RAM, porém, foram selecionados 8 que dispunham de FC, possibilitando sua aplicação na AICV.

O CED, CExD e CEENE com escopo de avaliação análogos, se diferenciam pela unidade de contabilização e representam uma sequência de evolução. CExD e CEENE apresentam maior escopo de aplicação e robustez científica, por serem baseados na segunda Lei da Termodinâmica. CEENE representa um avanço em relação ao CExD, com um número superior de fluxos elementares e corrige inconsistências no cálculo da exergia de metais e minerais. A partir da versão 2.0, o CEENE regionalizou os FC para ocupação do solo. O SED segue a abordagem do CEENE, com número elevado de FC, porém, a sua abordagem através da emergia ainda não é consenso na comunidade científica. O ICEC/ECEC utiliza abordagens complementares do SED e CEENE, diferenciando-se, porém, por ter como base inventários do tipo *extended input-output* e não apresentar FC regionalizados. A Pegada Ecológica (EF) foi operacionalizada como um método *ad hoc*, com aplicação restrita e não consensual na ACV. Considerando a limitação de espaço, os métodos foram descritos sinteticamente na Tabela 1.

Tabela 1: Descrição sintética dos métodos e modelos para contabilização de recursos em nível de RAM

MA	RB	Breve descrição
CED	VDI (1997); Hischer et al. (2009)	O <i>Cumulative Energy Demand</i> (CED) é um exemplo de operacionalização de método para quantificação de consumo energético para ACV. O CED (e seus métodos similares) quantifica apenas os recursos que possuem poder calorífico, sendo uma limitação para a quantificação de recursos, ficando restrito aos recursos energéticos (fóssil, nuclear, solar, geotérmico, eólico, potencial) e biomassa. Por utilizar energia como unidade contábil (primeira lei da termodinâmica)
CExD	Bosch et al. (2007)	O <i>Cumulative Exergy Demand</i> (CExD) é um método de contabilização de recursos análogo ao CED, utilizando a exergia (2ª lei da termodinâmica) no lugar de energia como unidade contábil. A exergia de um recurso ou sistema é a quantidade máxima de trabalho útil que pode ser obtido (Dewulf et al., 2008). Com o uso da exergia é possível contabilizar diversos tipos de recursos: energias fóssil, nuclear, cinética, solar, potencial, biomassa, água, metais e minerais.
CEENE	Dewulf et al. (2007)	O <i>Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment</i> (CEENE) é um método que agrega diferentes tipos de recursos em uma unidade comum (exergia). Ele considera diversos fluxos elementares, superior a outros métodos equivalentes (p.ex., CExD). É visto como um avanço em relação ao CExD e ao CED. Difere do CExD na contabilização da exergia dos metais, dos minerais e dos recursos bióticos (biomassa e/ou uso do solo). O CEENE original (v1.0) não apresenta regionalização dos FC. Porém, na versão 2.0, considera a regionalização para a ocupação do solo, com base em Alvarenga et al. (2013). Os FC são disponibilizados em diferentes escalas, desde FC genérico (mundial), continental, países, regiões/estados (6 países) e em escala de ~10x10 km.

SED	Rugani et al. (2011)	O <i>Solar Energy Demand</i> (SED) utiliza o conceito de emergia (Odum, 1996) como fundamento. Na emergia, o berço de uma análise ambiental não ocorre no limite entre o meio natural e o antrópico (tecnosfera), mas sim nos limites da geobiosfera, ou seja, o berço é o Sol, energia das marés e energia geotérmica, agregadas em um indicador de energia solar equivalente. Neste método de AICV os autores focaram em criar um número elevado FC, compilando as diversas publicações que haviam quantificado as <i>transformidades</i> ¹ de diferentes recursos naturais. Os FC, porém, não são regionalizados.
MIPS	Ritthouff et al. (2002)	O <i>Material Inputs Per Service</i> (MIPS) é um indicador da quantidade acumulada de recursos de um produto ao longo do seu ciclo de vida. Algumas vezes é chamado de Pegada de Materiais (<i>material footprint</i>). É definido pelo quociente entre a quantidade de material utilizada e a quantidade de serviço ou produto gerado, tendo massa como unidade de medida. O MIPS está baseado numa abordagem conhecida por <i>Material Flow Analysis</i> , diferenciando cinco classes de materiais: recursos abióticos e bióticos, movimentação do solo, água e ar. Em Saurat e Ritthoff (2013) foi proposto o cálculo de FC para a base de dados ecoinvent v2.2 porém, ainda incompletos. A regionalização ocorreu em nível de inventário (ICV), e não de caracterização (AICV).
LREx	Alvarenga et al. (2013)	O <i>Exergy-based accounting for land resource</i> (LREx) é um método de contabilização do uso da terra, complementar ao CEENE, utilizando exergia como unidade. O método considera características específicas dos diferentes ambientes, baseado na biomassa extraída em ambientes naturais (potencial de produção primária líquida natural) e em uso do solo para ambientes antrópicos. Apresenta FC regionalizados, disponibilizados em diferentes escalas a partir de um grid com 5' de resolução ($\approx 10 \times 10$ km no equador) para o ano 2000. O LREx é um método específico para o fluxo elementar uso do solo, portanto, não se propõe a ser completo como método de AICV.
ICEC/ECEC	Hau e Bakshi (2004); Zhang et al. (2010)	O <i>Industrial Cumulative Exergy Consumption/ Ecological Cumulative Exergy Consumption</i> (ICEC/ECEC) é um método de AICV baseado na exergia. Ele possui FC operacionais para inventários do tipo <i>extended input-output</i> (<i>USA Input-Output Database 1997</i>), diferente dos outros métodos de AICV, mencionados neste trabalho, que se baseiam em inventários de processo (<i>process-based</i>), como p, ex., Ecoinvent. Inicialmente foi quantificado o consumo acumulado de exergia no ciclo de vida, ICEC (Szargut, 1988). Posteriormente, foi inserido os serviços ecossistêmicos, para integrar ACV e avaliação econômica de recursos naturais (ECEC) (Zhang et al., 2010). O método utiliza os princípios de emergia na contabilização do consumo de exergia de bens e serviços ecológicos em unidade equivalente de energia solar, similar ao SED. O ICEC/ECEC não apresenta FC regionalizados.
EF	Wackernagel e Rees (1996); Huijbregts et al. (2008)	A pegada ecológica (EF) é definida como a área de água e terra biologicamente produtiva necessária para suprir recursos naturais e absorver resíduos gerados (direta ou indiretamente) por uma população região, país ou produto. Ela avalia as áreas em seis classes: (1) Área necessária à produção de culturas agrícolas; (2) Área necessária para florestas; (3) Área necessária para pastagem; (4) Área necessária para água; (5) Área de infraestrutura; e (6) Área necessária para sequestrar as emissões atmosféricas de CO ₂ . A EF foi operacionalizada como um método de AICV, com uma adaptação para contabilizar recursos nucleares (Huijbregts et al., 2008). Pode ser interpretado como um método complementar ao CED/CExD. A EF pode ser regionalizada para diferentes escalas geográficas, com base na biocapacidade específica, porém ainda não existe um método de AICV operacional com FC regionalizados.

* MA - Método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

** RA - Referência base do método

A Tabela 2 apresenta os resultados da avaliação dos métodos de AICV em nível de RAM, selecionados neste estudo.

O método CEENE v.2.0 alcançou a maior nota dentre os oito métodos identificados neste estudo, tanto para robustez científica (5,0), como para o escopo de avaliação (5,0). É fundamentado na segunda lei da

¹Transformidade é o nome dado no meio científico da Emergia ao que é conhecido como fatores de caracterização, no meio científico da Avaliação do Ciclo de Vida.



termodinâmica, portanto, mais robusto do que métodos baseados na primeira lei. Considera um número elevado de fluxos elementares regionalizados a partir da versão 2.0. com o trabalho de Alvarenga et al. (2013).

Tabela 2: Avaliação dos métodos e modelos utilizados na AICV para a AoP recursos em nível de RAM

Método de AICV	Proposta de utilização	Nota – critério Escopo	Nota – critério Robustez científica	Nota Final
CEENE*	Completo	Alto (5)	Alto (5)	5,0
CExD	Completo	Médio (3)	Médio (3)	3,0
CED	Completo	Baixo (1)	Médio-baixo (2)	1,5
SED	Completo	Médio-alto (4)	Médio-alto (4)	4,0
MIPS	Completo	Médio (3)	Médio-baixo (2)	2,5
LREx	Específico**	Baixo (1)	Alto (5)	3,0
ICEC/ECEC	Completo	Médio-alto (4)	Médio-alto (4)	4,0
EF	Completo	Médio (3)	Médio-baixo (2)	2,5

* foram avaliados a v1.0 e a v.2.0

** específico para uso do solo

No extrato inferior, com notas médias abaixo de 3,0 encontram-se os métodos CED (1,5), MIPS (2,5) e EF (2,5), especialmente pela robustez científica baixa, considerando inconsistências no cálculo dos FC e estarem baseado em teorias científicas mais antigas.

No extrato intermediário com nota igual a 4,0 para escopo e robustez científica, temos o SED e o ICEC/ECEC, que também apresentam número elevado de FC, porém não apresentam FC regionalizados. Do ponto de vista da robustez científica, os dois métodos se apóiam no conceito de emergia, que encontra questionamentos por parte da comunidade científica de ACV.

CExD e LREx alcançaram a mesma nota (3,0), porém por distintos caminhos. Enquanto o LREx se destaca pela robustez científica é limitado quanto ao escopo, uma só possui FC para uso do solo. O CExD, possui notas equilibradas para robustez científica e escopo, por estar fundamentado na segunda lei da termodinâmica e número elevado de FC, porém não regionalizados.

Conclusão

Avaliando-se os 8 métodos em nível de RAM, concluiu-se com base nos critérios adotados que, quando o estudo de ACV utilizar o *extended input-output* ICV o método mais recomendado é ICEC/ECEC, enquanto se o estudo utilizar *process-based* ICV ou uma abordagem híbrida, o método mais recomendado é o CEENE v2.0. Opcionalmente, o método SED pode ser recomendado para uso de forma complementar ao CEENE v.2.0, considerando a nota relativamente alta obtida.

Referências Bibliográficas

Alvarenga RAF, Dewulf J, Langenhove H, Huijbregts MAJ (2013) Exergy-based accounting for land as a natural in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 939-947.

CONMETRO (2011) Aprova o Regimento Interno e a composição do Comitê Gestor do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Resolução 01/2011. Conselho Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (CONMETRO).

Dewulf J, Bosch ME, Meester BD, Vorst GVd, Langenhove HV, Hellweg S, Huijbregts MAJ (2007)



V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida

20 a 23 de Setembro 2016 - Fortaleza, CE

Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting. *Environmental Science & Technology*, 41, 8477-8483

Dewulf J, Van Langenhove H, Muys B, Bruers S, Bakshi BR, Grubb GF, Paulus DM, Sciubba E (2008) Exergy: Its Potential and Limitations in Environmental Science and Technology. *Environmental Science & Technology*, 42, 2221- 2232

Hau JL, Bakshi BR (2004) Expanding Exergy Analysis to Account for Ecosystem Products and Services. *Environmental Science & Technology*, 38, 3768-3777

Hischier R, Weidema B, Althaus H-J, Doka G, Dones R, Frischknecht R, Hellweg S, Humbert S, Jungbluth N, Loerincik Y, Margni M, Nemecek T, Simons A (2009) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Final Report ecoinvent v2.1., vol No. 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, St. Gallen, Switzerland

Huijbregts MAJ, Hellweg S, Frischknecht R, Hungerbuhler K, Hendriks AJ (2008) Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. *Ecological Economics*, 64, 798 - 807

International Reference Life Cycle Data System (ILCD) (2011). European Commission Joint Research Centre (2011) International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook-Recommendations for Life Cycle Assessment in the European context. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Koche JC (1997) Fundamentos de Metodologia Científica: teoria da ciência e prática da pesquisa. 14. ed. Petrópolis: Vozes. 180 p.

Lakatos EM, Marconi MA (1993) Fundamentos de metodologia científica. São Paulo: Atlas. 231p.

Liao W, Heijungs R, Huppes G (2012) Thermodynamic resource indicators in LCA: a case study on the titania produced in Panzhihua city, southwest China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 951-961.

Odum HT (1996) Environmental Accounting: Emery and Environmental Decision Making. 1st edn. John Wiley & Sons, New York (USA)

Rede de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida (RAICV) (2014) Regimento da Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida. São Bernardo do Campo, 11/11/2014.

Ritthoff M, Rohn H, Liedtke C (2002) MIPS Berechnen: Ressourcenproduktivität Von Produkten Und Dienstleistungen. Wuppertal Spezial. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal (Germany)

Rugani B, Huijbregts MAJ, Mutel C, Bastianoni S, Hellweg S (2011) Solar Energy Demand (SED) of Commodity Life Cycles. *Environmental Science & Technology*, 45, 5426-5433

Swart P, Alvarenga RAF, Dewulf J (2015) Abiotic resource use. In *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment, volume IV: life cycle impact assessment* (eds M. Hauschild and M.A.J. Huijbregts) Springer Press, Dordrecht, pp. 247–269

VDI (1997) Cumulative Energy Demand - Terms, Definitions, Methods of Calculation. VDI guideline 4600. Verein Deutscher Ingenieure, Dusseldorf, Germany

Wackernagel M, Rees W (1996) Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. NSP, Canada

Zhang Y, Baral A, Bakshi BR (2010) Accounting for Ecosystem Services in Life Cycle Assessment, Part II: Toward an Ecologically Based LCA. *Environmental Science & Technology*, 44, 2624-2631