



## Recomendação de métodos de AICV para depleção de recursos abióticos

Rodrigo A. F. Alvarenga<sup>1</sup>, Ittana de Oliveira Lins<sup>2</sup>, José Adolfo de Almeida Neto<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), [alvarenga.rag@gmail.com](mailto:alvarenga.rag@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

<sup>3</sup>Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC)

**Resumo.** Recursos abióticos são aqueles que têm sua origem através de processos biológicos ou químicos que ocorreram no passado, e incluem combustíveis fósseis, metais, minerais, água, solo, entre outros. Em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), os impactos relacionados a recursos (bióticos e abióticos) são avaliados na área de proteção (AoP) de mesmo nome, através de métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV). Existem diversos métodos de AICV disponíveis na literatura que tratam de recursos abióticos, e o objetivo deste estudo foi de propor uma recomendação de qual(is) método(s) utilizar. Apesar de depleção de recursos abióticos ser uma categoria de impacto que não precisa ser regionalizada, o objetivo deste estudo vem de uma proposta de recomendação feita por especialistas na área no Brasil, dentro de um contexto maior em recomendações de diferentes métodos de AICV, a partir da Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (RAICV). Este estudo focou apenas nos métodos que avaliam a depleção de recursos abióticos, como, metais, minerais e combustíveis fósseis, exceto solo e água. Avaliou-se 11 métodos de AICV, através de dois critérios (robustez científica, e escopo), que foram divididos em dois níveis de impacto: métodos de ponto médio e métodos de ponto final. Para métodos de ponto médio, recomendou-se o método ADP, com a abordagem de reserva de recursos, que é a recomendada pelo ILCD, por ter apresentado a melhor pontuação tanto para robustez científica quanto para escopo. Já para métodos de ponto final, recomendou-se tanto o Recipiente Endpoint quanto o EPS2000, pois apresentaram a mesma pontuação final na avaliação feita pelos critérios acima mencionados. Pôde-se notar que a avaliação na AoP Recursos ainda não está consolidada na comunidade de ACV, uma vez que se observou um grande número de novos métodos de AICV (com novas abordagens) e também novas propostas de avaliação desta AoP, e espera-se que esta tendência continue no futuro.

**Palavras-chave.** Recursos; Abióticos; Recomendação; AICV; Brasil.

### Introdução

Os avanços na área de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em nível mundial vem sendo amplamente divulgados na literatura (GUINÉE, 2011). Para o Brasil, observamos um avanço em publicações científicas, vide avanços na área acadêmica, acentuado nos últimos anos (ZANGHELINI et al., 2014). Em nível institucional, pode-se citar a criação da Associação Brasileira do Ciclo de Vida em 2004, os congressos brasileiros no tema a partir de 2008, a criação da Rede Empresarial de ACV em 2012 e o lançamento do Programa Brasileiro de Ciclo de Vida (PBCV) em 2011; entre outras ações. Com relação ao PBCV, ele é composto por cinco comissões técnicas, sendo a terceira com foco em Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), que tem como principal objetivo a regionalização de métodos de AICV para o contexto brasileiro (CONMETRO, 2011).

Existem métodos de AICV disponíveis para as mais variadas categorias de impacto ambiental, como Acidificação, Toxicidade, Perda de biodiversidade devido ao uso do solo, por exemplo. Dentre estas categorias de impacto, existe a que trata de impactos devido ao consumo de recursos naturais. Vale ressaltar que recursos naturais são vistos de duas maneiras em ACV: Por um lado, eles representam entradas necessárias nos processos industriais, na produção de um determinado produto (final ou intermediário), desta forma analisados na etapa de inventário de ciclo de vida (ICV); e por outro lado, eles são analisados como uma área de proteção (AoP), na AICV, ou seja, ao considerar o ciclo de vida de um produto, um dos impactos que é analisado é o dano aos recursos naturais. Recursos naturais podem ser classificados de diversas maneiras, (1) renováveis ou não-renováveis; (2) depósitos, reservas ou fluxos; (3) bióticos ou abióticos; sendo estes, os considerados relevantes para este estudo (SWART et al., 2015). Com relação a última forma de classificação, recursos bióticos seriam todos aqueles materiais originais de organismos vivos, enquanto que recursos abióticos são produtos de processos biológicos do passado (p.ex., petróleo) ou processos físico-químicos.

Com relação à métodos de AICV que tratam de recursos naturais, existem diferentes métodos elaborados a partir de diferentes escolas de pensamento. De acordo com classificações mais tradicionais (SWART et al., 2015; ILCD, 2011), os métodos de AICV da categoria recursos podem ser divididos em três grupos: (1) métodos de contabilização de recursos; (2) métodos de ponto médio (*midpoint*); e (3) métodos de ponto final



(*endpoint*). No entanto, existem outras abordagens de classificação dos impactos devido ao consumo de recursos (DEWULF et al., 2015; RORBECH et al., 2014). Considerando a classificação tradicional supracitada, existem estudos já publicados que recomendam métodos de AICV para a categoria recursos, como Liao et al. (2012) para métodos de contabilização de recursos com base em termodinâmica e ILCD (2011), que propõe o método de ponto médio ADP (GUINÉE, 1995) como o recomendado para o contexto Europeu.

Dentro do escopo das atividades do PBCV, antes de se regionalizar métodos de AICV, é importante avaliar quais são os mais recomendados para o contexto Brasileiro e, posteriormente, buscar quais seriam mais interessantes para regionalização. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar métodos de AICV para a categoria de impacto Depleção de Recursos Abióticos, com vistas de proposição de recomendação para uso no Brasil.

## Materiais e Métodos

Para compreender o estado da arte dos métodos e modelos de AICV, relacionados à categoria de impacto “recursos abióticos”, adotou-se o levantamento bibliográfico de documentos disponíveis no Portal de Periódicos da Capes dos últimos vinte anos, publicados até dezembro de 2014, bem como, manuais e documentação associados a métodos de AICV reconhecidos pela comunidade científica. Na busca dos métodos de AICV foram utilizadas, de forma isolada ou em associação, diversas palavras referentes à depleção de recursos abióticos.

A análise crítica e avaliação dos modelos e métodos de AICV foram realizadas com base numa matriz de critérios definidas com base na opinião dos especialistas que compõem a Rede de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (RAICV). Os critérios (escopo, robustez científica, possuir fatores de caracterização (FC) regionalizados e possibilidade de regionalização de FC) foram criados para avaliar diferentes categorias de impacto ambiental em ACV (p.ex., eutrofização, uso do solo e recursos). Pode-se observar que o terceiro e quarto critérios são referentes à regionalização de FC. Porém, de acordo com van Oers (2002), não há motivo metodológico para regionalizar a categoria de depleção de recursos abióticos (em ponto médio e ponto final), uma vez que o mercado de recursos minerais e fósseis é global, consequentemente, os problemas ambientais são globais (e não regionais ou locais). Assim, nesta pesquisa avaliaram-se apenas dois critérios: (1) Escopo (número de FC); e (2) Robustez científica do método. A partir da avaliação qualitativa dos métodos para cada um dos critérios e da avaliação quantitativa com base na ponderação de valores dos critérios qualitativos pré-estabelecidos, foi possível fazer uma recomendação de métodos de AICV para o Brasil, baseado nos que obtiveram as pontuações mais elevadas. 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 levantados 11 métodos de AICV disponíveis na literatura que tratam de depleção de recursos abióticos, tanto em ponto médio (6) como em ponto final (5). Devido a limitação de espaço, a descrição dos métodos é feita de forma sucinta na Tabela 1. Estes métodos foram avaliados baseados nos critérios mencionados e o resultado da avaliação está exposta na Tabela 2.

Para ponto médio o método ADP foi o mais recomendado, por apresentar um elevado número de FC, portanto, recebendo maior valor para o critério escopo; mas também tendo um modelo de caracterização consagrado pela comunidade científica e mais robusto que outro método tradicional (EDIP), por considerar não apenas as reservas, mas a taxa de extração no seu cálculo. Como o ADP apresenta três abordagens (recursos totais, reserva base e reserva econômica), a recomendada por esta pesquisa é a reserva base, devido à maior relevância ambiental, uma vez que com o aumento da escassez de recursos, reservas além das econômicas (p.ex., reservas marginais) já começam a ser utilizadas (p.ex., gás de xisto) e, por outro lado, os recursos totais podem incluir depósitos com concentração muito baixa (que dificilmente serão usados para extração), o que pode levar a resultados equivocados. Esta recomendação é corroborada pela análise feita por ILCD (2011).

Para ponto final, os métodos Recipe Endpoint e EPS2000 foram os recomendados, principalmente por apresentarem um escopo elevado, considerando um maior número de fluxos elementares e diferentes recursos abióticos (fósseis e metais), bem como, por terem uma abordagem científica mais robusta que o Eco-indicator 99 e o Exergoecology. Ainda, as novas tendências em AICV apresentadas pelos métodos OGD (ponto médio) e

SuCo (ponto final) oferecem uma elevada robustez científica e, como há a possibilidade da incorporação destes métodos ao Recipe Endpoint no futuro próximo (PONSIOEN, 2015), espera-se que as novas versões do Recipe Endpoint sejam mais robustas. Desta forma, uma nova análise de recomendação de método para ponto final poderá ser necessária num futuro próximo.

Tabela 1: Breve descrição dos métodos de AICV referentes a depleção de recursos abióticos

Método de AICV	Referência base	Nível do impacto	Breve descrição
ADP (Abiotic depletion potential)	Guiné (1995) e van Oers et al. (2002)	Ponto médio*	Utiliza equação que envolve a divisão da taxa de extração de determinado recurso pelo o quadrado da quantidade deste recurso disponível em depósitos. Os recursos são normalizados para o FC do antimônio (Sb). Utiliza como base de cálculo os recursos totais ( <i>ultimate reserves</i> ) e também a reserva base ( <i>reserve base</i> ) e a reserva econômica ( <i>economic reserve</i> ).
EDIP	Hauschild e Wendel (1998)	Ponto médio	Utiliza uma equação para criar os FC que envolvem apenas a quantidade deste recurso disponível em depósitos. Os FC são baseados na reserva econômica ( <i>economic reserve</i> ). Para recursos abióticos, não há diferença entre a versão 97 e 2003
Recipe Midpoint	Goedkoop et al. (2009)	Ponto médio**	Apresenta FC para recursos fósseis, metais e minerais, calculados através de abordagens diferentes. Para os recursos fósseis, o Recipe Midpoint considera o poder calorífico. Para metais e minerais, avalia através dos depósitos de minerais, e não pelos metais em si.
ORI	Swart e Dewulf (2013)	Ponto médio	Utiliza uma abordagem similar ao Recipe Midpoint, porém, apresenta uma vasta base de dados que contém informação de diferentes minas, com dados de mais de uma década.
AADP	Schneider et al. (2011)	Ponto médio	Pode ser considerado como um método complementar ao ADP, ao tentar incluir na análise os recursos que já foram extraídos de seus depósitos e estão disponíveis na tecnosfera (p.ex., em aterros sanitários).
OGD	Vieira et al. (2012)	Ponto médio	Assim como o método ORI, o OGD avalia a variação no grau dos minérios ( <i>ore grade</i> ) devido à extração de metais, baseados no modelo de distribuição geológica.
Eco-indicator 99	Goedkoop e Spriensma, 2000	Ponto final	Avalia o impacto final do uso de recursos fósseis, metais e minerais por meio de uma abordagem que considera o aumento de trabalho (futuro) na extração de recursos em reservas de mais difícil acesso (p.ex., reservas marginais).
Recipe Endpoint	Goedkoop et al. (2009)	Ponto final	A versão endpoint do Recipe vai além na relação causa-efeito, avaliando o aumento no custo da extração daqueles recursos, devido a sua depleção.
EPS2000	Steen (1999a,b)	Ponto final	O EPS2000 utiliza a abordagem de valoração ambiental, utilizando uma abordagem que quantifica o custo da exploração sustentável dos recursos não renováveis. Para isso, propõe um cenário de mercado que utiliza o custo de produção de uma substância similar.
SuCo	Ponsioen et al. 2014	Ponto final	Usa abordagem parecida com o Recipe Endpoint, porém, utiliza-se de dados mais representativos, específicos para cada recurso fóssil.
Exergoecology	Valero e Valero (2010; 2012)	Ponto final	Quantifica a depleção de metais e minerais através do custo exergético, necessário para disponibilizar o recurso de resíduo em um recurso natural, como uma abordagem <i>grave-to-cradle</i> .



\* Para a abordagem de recursos totais (*ultimate reserves*), nas últimas atualizações os FC de combustíveis fósseis são baseados no poder calorífico do recurso, portanto, pode ser considerada como uma avaliação em nível de contabilização de recursos apenas e não como ponto médio

\*\* A abordagem para combustíveis fósseis pode, talvez, ser interpretada apenas como uma forma de contabilização de recursos, não avaliando a depleção em ponto médio

Tabela 2: Avaliação qualitativa dos métodos de AICV para depleção de recursos abióticos em ponto médio e ponto final

Método de AICV	Nível do impacto	Nota – critério Escopo	Nota – critério Robustez científica	Nota Final
ADP	Ponto médio	5	4	4,50
EDIP	Ponto médio	4	3	3,50
Recipe Midpoint	Ponto médio	3	3	3,00
ORI	Ponto médio	1	5	3,00
AADP	Ponto médio	1	5	3,00
OGD	Ponto médio	0,5*	5	2,75
Eco-indicator 99	Ponto final	3	2	2,50
Recipe Endpoint	Ponto final	4	3	3,50
EPS2000	Ponto final	5	2	3,50
SuCo	Ponto final	1	4	2,50
Exergoecology	Ponto final	1	4	2,50

\* Optou-se-se dar uma nota abaixo de 1,0 para o método OGD, para diferenciá-lo entre os métodos com notas baixas, por ele produzir apenas um FC (para o cobre)

As notas atribuídas aos métodos são restritas a valores entre 1 e 5 e, portanto, limitando a possibilidade de diferenciação entre os métodos. Desta forma, métodos que tiveram resultados com mesmo valor, p.ex., ORI e OGD receberam nota 5 para o critério robustez científica, não devendo ser interpretados como métodos equivalentes pois, para atribuir estes valores de nota, subcritérios como transparência das equações do modelo, foram analisados onde algumas diferenças entre os métodos foram identificadas, chegando-se (de forma qualitativa) àqueles valores.

Ainda não existe um consenso na comunidade científica de ACV sobre como avaliar a categoria de impacto referente à AoP Recursos. Existem diferentes abordagens de avaliação sendo desenvolvidas (DEWULF et al., 2015; RORBECHE et al., 2014) e, paralelo a isso, novos métodos de AICV referentes à esta categoria estão surgindo (PONSINEN et al., 2014; SWART e DEWULF, 2013; SCHNEIDER et al., 2015).

## Conclusão

Este estudo avaliou 11 métodos de AICV que caracterizam impactos ambientais em depleção de recursos abióticos (exceto solo e água). Para ponto médio recomendou-se o método ADP, com FC baseados na reserva base; corroborando a recomendação de ILCD (2011) para o contexto europeu; enquanto que para ponto final recomendou-se os métodos Recipe Endpoint e EPS2000, com ressalva da possibilidade, num futuro próximo, do método Recipe Endpoint (nas novas atualizações) poder apresentar uma maior robustez científica com a incorporação do OGD e do SuCo aos seus modelos de caracterização. É importante mencionar que as recomendações propostas nesta pesquisa devem ser reavaliadas no médio prazo (cerca de cinco anos), considerando os avanços do desenvolvimento de métodos em curso.



## Referências Bibliográficas

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., BENINI, L., MANCINI, L., SALA, S., BLENGINI, G.A., ARDENTE, F., RECCHIONI, M., MAES, J., PANT, R. E PENNINGTON, D. (2015) Rethinking the Area of Protection “Natural Resources” in Life Cycle Assessment. *Environmental Science & Technology*, 49, pp. 5310-5317

GOEDKOOP M, HEIJUNGS R, HUIJBREGTS M, DE SCHRYVER A, STRUIJS J, VAN ZELM R (2009) ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report I: Characterisation

GOEDKOOP M, SPRIENSMA R (2000) The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report. PRe Consultants, Amersfoort, The Netherlands

GUINÉE J (1995) Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products. Leiden University, Leiden, The Netherlands

GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., ZAMAGNI, A., MASONI, P., BUONAMICI, R., EKVALL, T., RYDBERG, T. (2011) Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, 45, pp. 90-96.

HAUSCHILD M, WENZEL H (1998) *Environmental Assessment of Products - Volume 2: Scientific background*, vol 2. Chapman & Hall, London, UK

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.

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, pp. 951-961.

PONSIOEN TC, Vieira MDM, Goedkoop MJ (2014) Surplus cost as a life cycle impact indicator for fossil resource scarcity. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, pp. 872-881

PONSIOEN TC (2015). Comunicação pessoal. 7/8/2015.

ROBECH JT, VADENBO C, HELLWEG S, ASTRUP TF (2014) Impact Assessment of Abiotic Resources in LCA: Quantitative Comparison of Selected Characterization Models. *Environmental Science & Technology*, 48, pp. 11072-11081.

SCHNEIDER L, BERGER M, FINKBEINER M (2011) The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, pp. 929-936

SCHNEIDER L, BERGER M, FINKBEINER M (2015) Abiotic resource depletion in LCA - background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20, pp. 709-721

STEEN B (Org.) (1999a) *A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPD)*. Version 2000 - General System Characteristics (CPM report. Nr. 4). Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems, Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning Göteborg.

STEEN B (Org.) (1999b) *A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPD)*. Version 2000 - Models and Data of the Default Method (CPM report. Nr. 5). Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems, Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning Göteborg.

SWART P, DEWULF J (2013) Quantifying the impacts of primary metal resource use in life cycle assessment based on recent mining data. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, pp. 180-187

SWART P, ALVARENGA RAF, DEWULF J (2015) Abiotic resource use. *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

VALERO A, VALERO A (2010) Exergoecology: A thermodynamic approach for accounting the earth's mineral capital. The case of bauxite-aluminium and limestone-lime chains. *Energy*, 35, pp. 229-238.

VALERO A, VALERO A (2012) From Grave to Cradle. *Journal of Industrial Ecology*, 17, pp. 43-52.

VAN OERS L, DE KONING A, GUINÉE J, HUPPES G (2002) Abiotic resource depletion in LCA - Improving characterization factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. Road and Hydraulic Engineering Institute

VIEIRA MDM, GOEDKOOP MJ, STORM P, HUIJBREGTS MAJ (2012) Ore Grade Decrease As Life Cycle Impact Indicator for Metal Scarcity: The Case of Copper. *Environmental Science & Technology*, 46, pp. 12772-12778

ZANGHELINI, G.M., CHERUBINI, E., GALINDRO, B.M., ALVARENGA, R.A.F., SOARES, S.R. (2014) A Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil na Última Década. *IV Congresso Brasileiro sobre Gestão pelo Ciclo de Vida*, São Bernardo (SP), Brasil, pp. 379-387.