



Modelos de contabilização de recursos (RAM)

Autores

Rodrigo A. F. Alvarenga

José Adolfo de Almeida Neto

Ittana de Oliveira Lins

Leandro Andrade Pegoraro

Elaine Garcia de Lima

Leticia De Santi Barrantes

Maria Cléa de Brito Figueiredo

Ana Lídia Almeida Castro

5. Modelos de contabilização de recursos (RAM)

5.1. Introdução

Recursos naturais são essenciais para a sociedade, em diferentes usos, sejam eles de provisão, suporte, regulação ou culturais (MEA, 2005). Porém, o aumento populacional mundial aliado ao aumento do consumo per capita e métodos inadequados de gestão e manejo têm levado a crises na sustentabilidade destes recursos.

Uma das ferramentas que podem auxiliar na gestão sustentável destes recursos naturais, em escala industrial, é a ACV. Os recursos naturais são vistos de duas maneiras nesta metodologia de avaliação ambiental. 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 ICV. Por outro lado, eles são analisados como uma 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; entre outros (SWART et al., 2015). Com relação à última forma de classificação, recursos bióticos seriam todos aqueles materiais originários de organismos vivos e recursos abióticos são produtos de processos biológicos do passado distante (p.ex., petróleo) ou processos físico-químicos.

Com relação à AICV, existem diferentes modelos elaborados para avaliar tais impactos ambientais, de diferentes escolas de pensamento. De acordo com classificações mais tradicionais (ILCD, 2011; SWART et al., 2015), os modelos de AICV da categoria recursos podem ser divididos em três grupos: (1) para contabilização de recursos (RAM), que fazem uma análise mais simplificada dos impactos, focando principalmente em agrupar os recursos utilizados (no ICV) em indicadores únicos, como energia, exergia ou massa; (2) de depleção de recursos em nível de ponto médio, que vão além da categoria anterior, avaliando impactos relacionados à depleção daqueles recursos devido ao seu uso; e (3) de depleção de recursos em nível de ponto final, que buscam fazer uma análise além do que é feito nos modelos de ponto médio, considerando consequências da depleção de recursos, muitas vezes a partir do conceito de tecnologia alternativa (backup technology) (MULLER-WENK, 1998; STEWART E WEIDEMA, 2005), por exemplo, avaliando o esforço extra necessário (energia ou custo) para extrair outras formas de recursos.

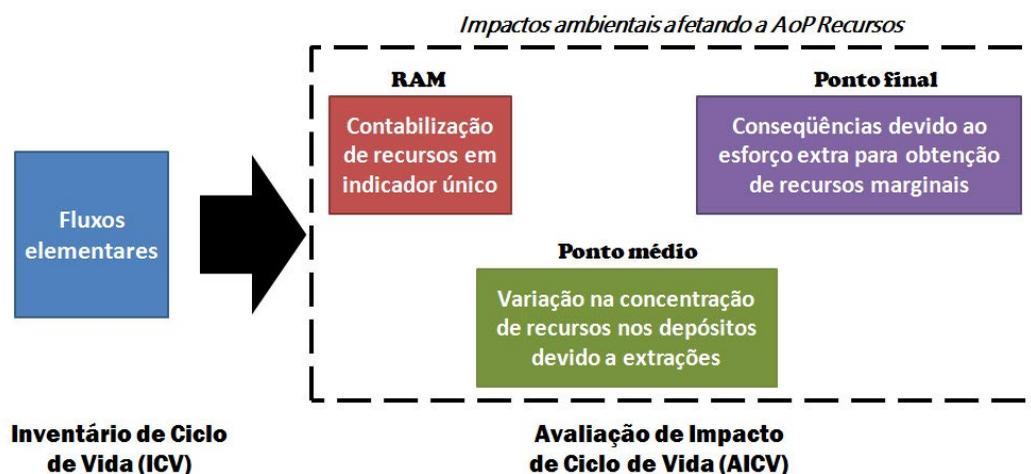
Devido à falta de consenso na comunidade científica de ACV referente a esta categoria de impacto ambiental, existem outras formas de classificação dos modelos de AICV e também de interpretação da AoP recursos. Rorbech et al. (2014) classificaram da categoria Recursos em três outros grupos: (1) modelos que quantificam o consumo de recursos limitados, que se preocupam mais com a competição dos recursos e assumem

que eles são substituíveis (classificação equivalente à RAM); (2) modelos que avaliam a perda de disponibilidade de recursos (depleção), que podem ser ainda subdivididos em ponto médio ou ponto final, e representam melhor a AoP de recursos; e (3) modelos que quantificam o aumento de esforço no futuro devido à extração atual (e.g. ReCiPe ponto final), que segundo os autores, não representa uma AoP específica, mas são impactos ambientais em ponto médio que afetam outras AoP (saúde humana e ecossistemas).

Dewulf et al. (2015) sugerem novas AoP para ACV e para Avaliação de Sustentabilidade de Ciclo de Vida (ASCV). Com relação à AoP recursos, os autores propõem cinco perspectivas: (P1) a preocupação está no recurso em si; (P2) a preocupação está na capacidade deste recurso em gerar serviços de provisão; (P3) a preocupação está na capacidade do recurso em gerar outros serviços ecossistêmicos; (P4) onde são considerados aspectos de ACV consequential, como mecanismos de mercado, para avaliar melhor o que a escassez de um recurso pode afetar a sociedade e a economia; e (P5) a preocupação é voltada para o bem-estar humano, dando uma visão mais holística ao agrupar as perspectivas anteriores. Os autores mencionam que as perspectivas P4 e P5 vão além da ACV clássica, e que seriam ideais para ASCV.

Apesar de existirem diferentes formas de interpretação e classificação dos modelos de AICV, e como eles se enquadram na AoP recursos, dentro da primeira análise da RAICV, foi considerada a visão mais tradicional, proposta por ILCD (2011) e Swart et al. (2015), conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Cadeia de causa-efeito para a categoria de impacto para AoP recursos



Observação: segundo classificação tradicional proposta por ILCD (2011) e Swart et al. (2015)

Neste contexto, existem estudos que já realizaram análises críticas de alguns modelos de AICV, propondo quais seriam mais vantajosos. Um destes estudos é de Liao et al. (2012), que realizou uma avaliação com base na termodinâmica, e apontou o Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE) (Dewulf et al., 2007) e o Solar Energy Demand (SED) (Rugani et al., 2011) como os mais recomendados para este tipo de abordagem. Em ILCD (2011), onde foi feita recomendações para modelos de AICV no contexto europeu, o modelo Abiotic Depletion Potential (ADP) (Guinée, 1995) adaptado a uma base de dados de reserva base foi o recomendado para uma análise em ponto médio, e não houve recomendação para análise em ponto final e nem para RAM.

Com um propósito similar ao de Liao et al. (2012) e ILCD (2011), ou seja, tentando direcionar qual modelo de AICV seria o mais recomendado, a RAICV avaliou diferentes modelos de AICV relacionados à categoria RAM para se utilizar em estudos de ACV no Brasil.

5.2. Metodologia

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 modelos de AICV reconhecidos pela comunidade científica. Na busca dos modelos de AICV foram utilizadas, de forma isolada ou em associação, as seguintes palavras-chave (em inglês): *Abiotic resource, Cumulative Energy Demand, Cumulative Exergy Demand, Solar Energy Demand, Damage category Resources, Energy Analysis, Energy Analysis, Exergetic LCA, Exergy Analysis, Extraction ratio, Life Cycle Assessment, Life Cycle Impact Assessment, Material Flow Analysis, Natural resource, Nuclear resource, Resource accounting, Resource consumption, Resource efficiency, Resource indicator e Resource use*. A análise crítica e avaliação dos modelos de AICV foram realizadas a partir de uma matriz de critérios definida com base na opinião dos especialistas que compõem a RAICV.

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), se o foco for dado a metais, minerais e recursos fósseis cujo mercado é global. . Dessa forma, pode-se interpretar que alguns recursos (p.ex., petróleo) não necessitam de regionalização quando se faz uma análise em nível de RAM. Entretanto, outros recursos analisados, como uso da terra e água, podem ser regionalizados nesta abordagem (RAM) para poder quantificar problemas ambientais regionais. Assim, os três critérios mencionados no capítulo 2 foram considerados com pesos diferentes no estudo feito para RAM, sendo atribuído aos critérios escopo e robustez científica, peso 2, e ao critério regionalização,

peso 1. O peso menor para regionalização foi atribuído devido a regionalização ser possível e/ou necessária apenas para alguns tipos de recursos naturais, como uso da terra e água (e não para todos). A partir da avaliação qualitativa dos modelos e da avaliação quantitativa a partir dos critérios pré-estabelecidos, foi possível fazer uma recomendação de modelos de AICV para o contexto brasileiro, baseado numa avaliação multicriterial quali-quantitativa descrita no capítulo 2. A pontuação final do critério escopo refletiu basicamente a classificação quanto ao subcritério fluxos elementares, onde 5, valor máximo, foi atribuído para os modelos mais representativos, ou seja, os principais fluxos elementares foram considerados no cálculo dos FC. Representatividade média, quando os fluxos elementares considerados foram parciais e representatividade baixa, quando somente um fluxo elementar foi considerado.

5.3. Resultados

O Quadro 14 apresenta os 11 modelos de AICV, em nível RAM, encontrados na literatura e avaliados nesse capítulo, com suas respectivas referências.

Quadro 14 - Modelos de contabilização utilizados para avaliar impactos na AoP recursos abióticos.

Modelo	Referência
CED	VDI, 1997; Hischier et al., 2009
MIPS	Schmidt-Bleek, 1993; Ritthoff et al. 2002
CExD	Bosch et al., 2007
CEENE	Dewulf et al., 2007
LREx	Alvarenga et al., 2013
MEEx	Taelman et al., 2014
ICEC/ECEC	Hau e Bakshi, 2004
SED	Rugani et al., 2011
EF	Wackernagel e Rees, 1996
Pegada Hídrica	Hoekstra et al., 2011
ReCiPe (Água)	Goedkoop et al. 2009

O Quadro 15 mostra a classificação atribuída a cada modelo de AICV, em nível RAM, de acordo com o critério abrangência do escopo de aplicação.

Quadro 15 - Caracterização e classificação para o critério escopo para RAM

Modelo	Abrangência do escopo de aplicação			Pontuação
	Geográfico	Fluxos elementares	Compartimentos	
CED	Não se aplica	Representatividade baixa	Não se aplica	1
MIPS	Não se aplica	Representatividade média	Todos	3
CexD	Não se aplica	Representatividade média	Não se aplica	3
CEENE	Não se aplica	Representativo	Não se aplica	5
LREx	Não se aplica	Representatividade baixa	Não se aplica	1
MEEEx	Não se aplica	Representatividade baixa	Não se aplica	1
ICEC/ECEC	Não se aplica	Representativo	Não se aplica	5
SED	Não se aplica	Representativo	Todos	5
EF	Global	Representatividade baixa	Todos	1
Pegada Hídrica	Global	Representatividade baixa	Água	1
ReCiPe (Água)	Global	Representatividade baixa	Água	1

O Quadro 16 mostra a classificação atribuída a cada modelo de caracterização de acordo com o critério ‘robustez científica’.

Quadro 16 - Classificação atribuída a cada modelo de caracterização, presentes nos modelos RAM analisados, de acordo com o critério robustez científica.

Modelo RAM	Reconhecimento pela comunidade científica (implementação em métodos operacionais de AICV)	Cadeia de causa-efeito	Transparência e acessibilidade		Pontuação
			Transparente	Acessível	
CED	Parcialmente	Sim	Transparente	Acessível	2
MIPS	Parcialmente	Sim	Transparente	Limitada acessibilidade	2
CexD	Sim	Sim	Transparente	Acessível	3
CEENE	Sim	Sim	Transparente	Acessível	5
LREx	Sim. Complementa CEENE	Sim	Transparente	Acessível	4
MEEx	Sim. Complementa CEENE	Sim	Transparente	Acessível	4
ICEC/ECEC	Sim. Complementa CExD	Sim	Transparente	Acessível	4
SED	Sim	Sim	Transparente	Acessível	4
Pegada Ecológica	Não	Sim	Transparente	Limitada acessibilidade	2
ReCiPe (água)	Não	Sim	Transparente	Acessível	1
Pegada Hídrica	Não	Sim	Transparente	Acessível	3

Abaixo estão os RAM encontrados na literatura que apresentam FC (portanto, são operacionais), ou seja, que têm aplicação direta em ACV.

5.3.1. CED

O Cumulative Energy Demand (CED) (Hischier et al., 2009) é um exemplo de um indicador para operacionalização da quantificação de consumo energético para ACV, introduzido nos anos 1970 por Pimentel et al. (1973) e Boustead e Hancock (1979), e

padronizado por VDI (1997). Este é um modelo de contabilização de recursos que utiliza o poder calorífico dos materiais como unidade de agregação, estando restrito a análise dos recursos energéticos (fóssil, nuclear, solar, geotérmico, eólico, potencial) e biomassa..

Frischknecht et al. (2015) levantaram diversos modelos que operacionalizaram o CED, apontando algumas diferenças, como o uso de poder calorífico superior ou inferior. O CED pode simplificar a análise de ACV, uma vez que apresentou uma correlação de resultados com diversos outros modelos (Huijbregts et al., 2006; Huijbregts et al., 2010), em especial à categoria de energia fóssil. Não é um modelo regionalizado, porém de acordo com Alvarenga (2013), pode considerar a diferenciação em nível de uso da terra, se feita uma adaptação dos FC à abordagem sugerida em Alvarenga et al. (2013), para evitar a dupla contagem com a biomassa.

Por utilizar energia, que é baseada na primeira lei da termodinâmica, sua robustez científica não é tão elevada, uma vez que modelos que consideram a segunda lei da termodinâmica têm maior credibilidade. Além disso, por apresentar FC apenas para recursos energéticos e biomassa (e genéricos), apresentou uma nota baixa para o critério escopo. As notas deste modelo, para os três critérios, estão presentes no (Quadro 17).

5.3.2. MIPS

O Material Inputs Per Service (MIPS) (Schmidt-Bleek, 1993; Ritthoff et al., 2002) é um indicador da quantidade acumulada de recursos de um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida, sendo algumas vezes chamado de Pegada de Materiais (*material footprint*). É definido pelo quociente entre a quantidade de material utilizado e a quantidade de serviço ou produto gerado, utilizando massa como unidade de medida.

O MIPS está baseado numa abordagem conhecida por Material Flow Analysis diferenciando cinco classes de materiais: recursos abióticos, recursos bióticos, movimentação do solo, água e ar (Ritthoff et al. 2002). Assim como outros RAM, o MIPS foi desenvolvido em paralelo à ACV (posteriormente considerado também como um método de AICV em nível de RAM), e se baseia no conceito de que quanto menos matérias-primas utilizadas, menor serão os impactos ambientais associados ao produto.

Em Saurat e Ritthoff (2013) é proposto pela primeira vez um modelo para calcular FC para a base de dados ecoinvent v2.2. Porém, os FC não são disponibilizados por completo na publicação, e os autores mencionam que esses FC são ainda uma “versão beta”, e que novos FC estarão disponíveis no website da Wuppertal Institute no futuro. Apesar de, em Ritthoff et al. (2002) e em Saurat e Ritthoff (2013), ser mencionada a possibilidade e implementação de regionalização do MIPS, na realidade os autores estão se referindo à regionalização em nível de inventário (ICV), e não em nível de caracterização (AICV), como

é abordado em LREx e CEENE. Desta forma, o MIPS não apresenta FC regionalizados.

Saurat e Ritthoff (2013) mencionaram algumas divergências e necessidades de adaptação do MIPS à base de dados doecoinvent, como a ausência do fluxo elementar relativo ao material estéril oriundo da mineração. Wiesen et al. (2014) apontaram inconsistências entre o MIPS e outros RAM (como o CED e CExD), entre os quais, o cálculo dos FC para metais, já que o MIPS considera também o material de escavação e o estéril na quantidade de material usado no MIPS, resultando em FC elevados, comparativamente a outros modelos de AICV. Por estas razões, o MIPS recebeu avaliação média-baixa (2) para robustez científica, média (3) para escopo e baixa (1) para regionalização (Quadro 17).

5.3.3. CExD

O Cumulative Exergy Demand (CExD) (BOSCH et al., 2007) é um modelo para contabilização de recursos que utiliza como espelhamento o CED, mas ao invés de usar energia (como no último), utiliza a exergia como unidade de avaliação. A exergia de um recurso ou sistema é a quantidade máxima de trabalho útil que pode ser obtido dele (Dewulf et al., 2008).

Com o uso da exergia, este modelo possibilita contabilizar diversos tipos de recursos: energia fóssil, nuclear, cinética, solar, e potencial; além de biomassa, água, metais e minerais. Uso da terra não é contabilizado para evitar dupla contagem com biomassa.

Este modelo não possui diferenciação espacial de seus FC, porém, de acordo com Alvarenga (2013), pode considerar a diferenciação em nível de uso da terra se feita uma adaptação dos FC à abordagem sugerida em Alvarenga et al. (2013).

Dewulf et al. (2007) e Swart et al. (2015) mencionam algumas inconsistências do CExD no cálculo da exergia de metais, minerais e recursos bióticos. Como o CExD utiliza a exergia (2ª lei da termodinâmica), apresenta uma robustez científica maior que o CED, além de maior número de FC (genéricos) e, por este motivo, apresentou uma nota média (3) para este critério. Para os critérios escopo e regionalização, o CExD ficou com nota 3 e 1, respectivamente (Apêndice – Quadro 17).

5.3.4. CEENE

O Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE) (DEWULF et al., 2007) é um modelo de contabilização de recursos que busca agregar diferentes tipos de recursos em uma unidade comum (exergia). Alguns trabalhos apontam o CEENE como melhor (ou um dos melhores) modelo de AICV para este mecanismo ambiental (LIAO et al., 2012). Uma das diferenças entre o CEENE e o CExD é a abordagem usada para contabilizar a exergia dos metais e minerais e dos recursos bióticos (biomassa e/ou uso da terra).

O CEENE considera diversos fluxos elementares, com um número maior que outros modelos que utilizam a mesma abordagem, como o CExD. Assim, dentro de seu escopo de aplicação (método de contabilização de recursos), é visto como um avanço ao CExD e, por usar exergia ao invés de energia, apresenta maior robustez científica que o CED.

O CEENE original (v1.0) não apresenta nenhuma regionalização dos FC. Porém, na versão 2.0, considera-se a regionalização dos FC para ocupação da terra, a partir do trabalho de Alvarenga et al. (2013) e, na versão 3.0 considera a regionalização para recursos marítimos, baseados em Taelman (2014).

Devido ao avanço na teoria da exergia, este modelo apresenta uma robustez científica maior que o CExD e um número mais elevado de FC. Além disso, as versões 2.0 e 3.0 apresentam FC regionalizados para uso da terra e recursos marítimos. Desta forma, o CEENE recebeu notas mais elevadas que os demais RAM, para escopo e robustez científica, e para regionalização recebeu nota média-alta (4), já que alguns FC ainda não estão regionalizados na versão 2.0 e 3.0 (Quadro 17).

5.3.5. LREx

O Exergy-based accounting for land resource (LREx) (ALVARENGA et al., 2013) é um modelo para contabilização do uso da terra como recurso natural, que se propõe a complementar o método CEENE na contabilização de recursos a partir de uma unidade comum (exergia). Esse modelo utiliza características específicas relacionadas aos diferentes ambientes, baseado na biomassa extraída para ambientes naturais e no uso da terra para ambientes antrópicos (baseado no potencial de produção primária líquida natural). 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.

Desta forma, o LREx apresentou uma robustez científica média-alta (4), nota de escopo baixa (1), e nota alta (5) para regionalização (Quadro 17). A nota baixa para o critério escopo deve-se ao fato do modelo apresentar FC apenas para uso da terras. Na realidade, o LREx é um modelo específico para um fluxo elementar específico (uso da terra), portanto, tendo uma proposta de ser complementar a outros RAM, e não de ser utilizado isoladamente.

5.3.6. MEEx

O Exergy-based accounting for marine environment (MEEx) (Taelman et al., 2014) é um modelo focado na contabilização de recursos naturais provenientes do mar, como frutos do mar, peixes, algas, etc; por meio da métrica de exergia. Utiliza uma abordagem parecida ao LREx, porém, voltada para recursos marítimos.

Pode ser interpretado como modelo complementar ao CEENE, numa versão 3.0 (assim como o LREx). O MEEEx considera médias das dez espécies comerciais de peixes mais capturadas no mundo, crustáceos, moluscos e também 32 espécies de algas marinhas, para poder quantificar os FC. De acordo com os autores, a partir dos FC é possível quantificar a exergia que é privada da natureza devido à ocupação de recursos marinhos para, por exemplo, aquicultura.

Desta forma, apresenta robustez científica média-alta (4), mas como é focada apenas para recursos marinhos, possui um escopo baixo (1). Por outro lado, apresenta FC regionalizados, incluindo para a costa brasileira, assim, apresentando nota alta para o critério regionalização (5).

5.3.7. ICEC/ECEC

O Industrial Cumulative Exergy Consumption/Ecological Cumulative Exergy Consumption (ICEC/ECEC) é um modelo de AICV desenvolvido por Hau e Bakshi (2004) e Zhang et al. (2010), baseado na exergia. Este modelo possui FC para bases de dados baseadas no modelo de inventário extended input-output (USA Input-Output Database, 1997), enquanto os outros modelos de AICV mencionados neste capítulo estão operacionais para inventários baseados em processo (process-based), como por exemplo, a base de dados ecoinvent.

Em um primeiro momento, os autores buscam operacionalizar a proposta de Szargut (1988) para quantificar o consumo acumulado de exergia ao longo do ciclo de vida, por meio do ICEC. Porém, é proposta também uma abordagem complementar à AICV tradicional, visando cobrir uma lacuna de integração entre ACV e avaliação econômica de recursos naturais, buscando trazer uma inserção dos serviços ecossistêmicos, por meio do ECEC (Zhang et al., 2010).

Para isso, são utilizados princípios da emergia, que possibilita contabilizar o consumo de exergia de bens e serviços ecológicos da natureza em uma unidade equivalente de energia solar. Desta forma, o ECEC apresenta uma abordagem parecida ao SED, em que a avaliação é feita considerando o “berço” na fronteira da geobiosfera (ao contrário dos métodos RAM mais tradicionais que consideram a fronteira entre natureza e tecnosfera como o “berço”).

Apesar de ter uma proposta de inclusão dos serviços ecossistêmicos na sua análise, através do ECEC, ela é ainda limitada, pois não inclui alguns serviços importantes como polinização e sequestro de carbono. Além disso, o ICEC/ECEC não apresenta FC regionalizados. Por outro lado, o ECEC propõe algumas soluções para resolver aspectos críticos da emergia, como alocação. Por estes motivos, o ICEC/ECEC recebeu

pontuação alta (5) para escopo, média-alta (4) para robustez científica e nota baixa (1) para regionalização (Apêndice – Quadro 17).

5.3.8. SED

O SED (“Solar Energy Demand”), desenvolvido por Rugani et al. (2011), é um RAM que utiliza o conceito de emergia (Odum, 1996) como principal fundamento. Na emergia, o berço de uma análise ambiental não está mais no limite entre o meio natural e o meio antrópico (tecnosfera), como feito por outros RAM (p.ex., CEENE), mas sim nos limites da geobiosfera, ou seja, o berço é o Sol, energia das marés e energia geotérmica, unificadas em um indicador de energia solar equivalente (SWART et al., 2015).

Neste modelo, os autores focaram em criar um número elevado de FC através da compilação de diversas publicações já realizadas no tema, que haviam quantificado as transformidades¹ (ODUM, 1996; RUGANI et al., 2011) de diferentes recursos naturais.

Quanto à questão de dupla contagem entre recursos bióticos e uso da terra, o SED segue a abordagem do CEENE, que escolhe por quantificar o uso da terra (ao contrário do CED e CExD, que escolhem quantificar a energia/exergia dos recursos bióticos), portanto, equivalente a este modelo neste aspecto.

Embora o SED apresente um número elevado de FC, estes não são regionalizados. A emergia é uma teoria ainda contestada por parte da comunidade científica, que vem buscando sanar alguns problemas e também alinhá-la à ACV (INGWERSEN, 2011; RUGANI E BENETTO, 2012), sendo o SED um dos primeiros resultados deste alinhamento. Por tais motivos, o SED recebeu nota média-alta e alta para robustez científica e para escopo, respectivamente, e nota baixa (1) para regionalização (Quadro 17).

5.3.9. Pegada Ecológica (PE)

A pegada ecológica (PE) é definida como a área de água e terra biologicamente produtiva que uma determinada população (região, país, ou produto) demanda (de forma direta e indireta) para se sustentar. Em outras palavras, é a área necessária para a produção dos recursos consumidos e absorção dos resíduos gerados (WACKERNAGEL E REES, 1996).

Essa pegada 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 dióxido de carbono (CO₂).

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

No contexto da ACV, a PE de um produto pode ser definida como o somatório do uso (direto e indireto) da terra ao longo do ciclo de vida deste produto. A PE foi operacionalizada como um modelo de AICV por Huijbregts et al. (2008) que incluíram também uma adaptação para contabilizar o uso de recursos nucleares. A PE demonstrou ser um bom indicador único para contabilizar impactos ambientais, porém não é recomendada para avaliação de produtos baseados principalmente em minerais e emissões de particulados (HUIJBREGTS et al., 2008).

Do ponto de vista do escopo de aplicação, pode ser interpretado como um modelo complementar ao CED/CExD, possibilitando a contabilização do uso da terra (land use) com um grau de incerteza relativamente baixo. Entretanto, é necessário realizar algumas adaptações no modelo para evitar dupla contagem.

A PE pode ser regionalizada para diferentes escalas geográficas, com base na biocapacidade específica, porém ainda não existe um modelo operacional que disponibilize FC regionalizados. Por outro lado, a PE considera somente fluxos elementares relacionados ao consumo de recursos fósseis e nucleares, uso da terra e emissão de CO₂. Vale ressaltar que a PE não se alinha completamente à AoP recursos, já que considera emissões de CO₂ também, portanto não sendo recomendado para a AICV na AoP Recursos. Por este motivo, obteve notas média (3), média-baixa (2) e baixa (1) para escopo, robustez científica e regionalização, respectivamente (Apêndice – Quadro 17).

5.3.10. Pegada Hídrica

A pegada hídrica (PH), de acordo com Hoekstra et al. (2011), é uma medida volumétrica da água utilizada em todo o processo de fabricação do produto analisado, esse consumo podendo ser contabilizado ao longo do ciclo de vida de um produto na etapa de inventário.

O modelo proposto por Hoekstra et al. (2011) considera o consumo de três diferentes tipos de água: (i) água azul, sendo as águas superficiais e subterrâneas utilizadas no processo; (ii) água verde, relacionada à utilização da água armazenada no meio ambiente como umidade do solo, e (iii) água cinza, relacionada à poluição e à qualidade da água. A pegada hídrica verde é baseada no consumo de água disponível no solo e absorvida pela planta, sendo relevante, principalmente, para produtos agrícolas e florestais. Já a pegada hídrica azul considera a água disponível em reservatórios (ex: lagos, represas e aquíferos) consumida (evaporação, incorporada ao produto ou lançada em outra fonte hídrica) em um processo. Nesse sentido, essas duas pegadas hídricas analisam a privação física da água. Já a pegada hídrica cinza indica o grau de poluição da água por meio da quantificação do volume de água necessário para diluir os poluentes, lançados em um processo, até padrões ambientais aceitáveis, sendo uma consideração qualitativa da escassez hídrica.

Dessa forma, esse modelo tem nível de fluxos elementares alto por considerar vários tipos de água diferentes, porém, é focado apenas em um tipo de recurso natural (água). Tem uma robustez científica moderada por apresentar as modelagens utilizadas e a cadeia de causa-efeito ambiental considerada. Além disso, não gera FC operacionais regionalizados e/ou de forma global, não disponibilizando fatores FC para o Brasil, tendo pontuação baixa no critério de regionalização. Portanto, recebeu pontuação baixa (1) para escopo, média (3) para robustez científica e baixa (1) para regionalização (Quadro 17).

5.3.11. ReCiPe (Água)

O modelo proposto por Goedkoop et al. (2009) para avaliação da depleção hídrica integra o método ReCiPe que gera FC para diferentes categorias de impacto, criando modelagens de AICV tanto para mecanismos ambientais próximos do ICV, quanto para ponto médio e ponto final.

O modelo de Goedkoop et al. (2009) está próximo do ICV por contabilizar apenas o volume de água consumido em processos relacionados ao ciclo de vida de um produto, caracterizando-se como um RAM. Essa água consumida pode ser originada de diferentes tipos de fonte, como lagos, rios, poços e etc. O modelo também não apresenta uma modelagem para a geração de FC regionalizados, considerando o valor de 1 m^3 consumido/ m^3 disponível para todas as fontes hídricas utilizadas. Dessa forma, esse modelo tem robustez científica limitada. Assim, o critério de regionalização obteve pontuação baixa. Como os FC são específicos para a água, o modelo recebeu pontuação baixa no critério escopo. Desta forma, ele recebeu nota baixa (1) para todos os critérios (Apêndice – Quadro 17).

5.3.12. Recomendação para RAM

Através dos resultados obtidos e representados no Quadro 17 e das explicações acima, que evidenciam as razões pelas notas obtidas em cada RAM, pode-se observar que o CEENE (v2.0 e/ou v3.0) é o modelo que obteve a nota mais alta, portanto seria o mais recomendado para uso no Brasil. Porém, observa-se que o ICEC/ECEC também obteve uma nota alta e é operacional em abordagem de extended input-output ICV, enquanto que o CEENE (e todos os outros RAM mencionados anteriormente) são operacionais para ICV baseados no processo (process-based). Assim, este relatório recomenda:

- O CEENE v2.0/3.0, quando o estudo utilizar o *process-based* ICV;

- O ICEC/ECEC, quando o estudo utilizar o extended input-output ICV;
- O CEENE v2.0/3.0, quando o estudo utilizar uma abordagem híbrida de ICV.

Além disso, seguindo a proposta existente no ICEC/ECEC, que realiza uma avaliação de duas abordagens complementares, a recomendação de Liao et al. (2012), e a nota relativamente alta obtida pelo método SED (Quadro 17), a RAICV recomenda o uso opcional do SED de forma complementar ao CEENE v2.0 (para process-based ICV ou abordagens híbridas de ICV).

5.4. Novas tendências

A comunidade científica em ACV ainda não chegou a um consenso sobre como avaliar os impactos ambientais referentes à categoria recursos. Porém, existem novas propostas de avaliação de impacto ambiental desta categoria (RORBECH et al., 2014; DEWULF et al., 2015), demonstrando que os modelos avaliados neste capítulo ainda não estão consolidados, e deverão surgir novas tendências no futuro.

Como mencionado por van Oers (2002), a depleção de recursos em nível de ponto médio e ponto final é avaliada em nível global, portanto, não sendo necessária a regionalização dos modelos de AICV. Porém, não se pode dizer o mesmo para os modelos em nível de RAM, em que há a necessidade de regionalizar alguns tipos de recursos, como feito no CEENE v2.0/3.0, para o uso da terra e recursos marítimos (através do LREx e MEEEx). O mesmo caminho pode ser seguido por outros modelos, como o ICEC/ECEC e o SED para uso da terra, por exemplo. Além disso, os RAM podem passar a regionalizar outros tipos de recursos, como recursos bióticos e água.

Observa-se também uma abordagem de avaliação alternativa às tradicionais em ACV, demonstradas pelos modelos ICEC/ECEC e SED, que traz os conceitos de exergia e emergência para a AICV. Esses conceitos têm forte apelo no conceito de sustentabilidade.

Por fim, ressalta-se que a análise comparativa de modelos RAM para recursos abióticos deve ser revisada periodicamente, na medida em que sejam incrementadas as bases de dados que dão suporte à geração de novos FC dos modelos já propostos e de outros em desenvolvimento.

5.5. Considerações finais

Este capítulo avaliou 11 modelos que avaliam recursos naturais sob a perspectiva de um RAM. Recomendou-se o modelo CEENE v2.0/3.0, quando se utilizar abordagens de ICV baseadas no processo e/ou abordagens híbridas de ICV, e o método ICEC/ECEC

para abordagens de ICV baseadas em tabelas de insumo-produto (extended input-output LCA). Além disso, fez-se uma recomendação opcional de utilização do modelo SED como complementar ao CEENE.

Vale ressaltar que a temporalidade da avaliação apresentada nesse capítulo deve ser levada em conta, principalmente devido à falta de consenso existente na comunidade científica de ACV em relação a como avaliar os impactos ambientais na AoP recursos. Sendo assim, sugere-se repetir esta avaliação no médio prazo de tempo, entre três e cinco anos, a depender do desenvolvimento metodológico nesta área.

Referências bibliográficas

Alvarenga RAF (2013) Environmental sustainability of biobased products: new assessment methods and case studies. 1. ed. 2013. 181p .

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

Bösch M, Hellweg S, Huijbregts M, Frischknecht R (2007) Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. The International Journal of Life Cycle Assessment 12,181-190

Boustead I, Hancock GF (1979) Handbook of Industrial Energy Analysis. Ellis Horwood Ltd.

CONMETRO (2010) Aprova o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Resolução 04/2010. Conselho Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (CONMETRO).

Dewulf J, Benini L, Mancini L, Sala S, Blengini GA, Ardente F, Recchioni M, Maes J, Pant R, Pennington D (2015) Rethinking the Area of Protection “Natural Resources” in Life Cycle Assessment. Environmental Science & Technology, 49, 5310-5317

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

Frischknecht R, Wyss F, Knöpfel SB, Lützkendorf T, Balouktsi M (2015) Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 957-969.

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

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 Reportecoinvent v2.1., vol No. 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, St. Gallen, Switzerland

Hoekstra AY, et al. (2011) Manual de Avaliação da Pegada Hídrica: Estabelecendo o Padrão Global. São Paulo: Earthscan

Huijbregts MAJ, Hellweg S, Frischknecht R, Hendriks HWM, Hungerbuhler K, Hendriks AJ (2010) Cumulative Energy Demand As Predictor for the Environmental Burden of Commodity Production. *Environmental Science & Technology*, 44, 2189-2196.

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

Huijbregts MAJ, Rombouts LJA, Hellweg S, Frischknecht R, Hendriks AJ, van de Meent D, Ragas AMJ, Reijnders L, Struijs J (2006) Is Cumulative Fossil Energy Demand a Useful Indicator for the Environmental Performance of Products? *Environmental Science & Technology*, 40, 641-648.

Ingwersen WW (2011) Emergy as a Life Cycle Impact Assessment Indicator. *Journal of Industrial Ecology*, 15, 550-567

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, Huppel 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.

MEA (2005) Ecosystem and human well-being, The Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington.

Müller-Wenk, R (1998) Depletion of Abiotic Resources Weighted on the Base of 'Virtual' Impacts of Lower Grade Deposits in Future; IWO Diskussionsbeitrag Nr. 57; Universität St. Gallen: St. Gallen, Switzerland.

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

Pimentel D, Hurd LE, Bellotti AC, Forster MJ, Oka IN, Sholes OD, Whitman RJ (1973) Food Production and the Energy Crisis. *Science*, 182, 443-449

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

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, 11072-11081.

Rugani B, Benetto E (2012) Improvements to Emergy Evaluations by Using Life Cycle Assessment. *Environmental Science & Technology*, 46, 4701-4712

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

Saurat M, Ritthoff M (2013) Calculating MIPS 2.0., *Resources*, 2, 581-607.

Schmidt-Bleek F (1993) *The Fossil Makers*. Basel, Boston, Berlin: Editora Birkhäuser. Disponível online em: <http://www.factor10-institute.org/publications.html>. 20/09/2015.

Stewart M, Weidema BP (2005) A Consistent Framework for Assessing the Impacts from Resource Use - A focus on resource functionality (8 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10, 240-247.

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

Szargut J, Morris DR, Steward FR (1988) Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Springer, Berlin

Taelman SE, De Meester S, Schaubroeck T, Sakshaug E, Alvarenga RAF, Dewulf J. (2014) Accounting for the occupation of the marine environment as a natural resource in life

cycle assessment: An exergy based approach. *Resource, Conservation and Recycling*, 91, 1-10.

Van Oers L, de Koning A, Guinee 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

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

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

Wiesen K, Saurat M, Lettenmeier M (2014) Calculating the Material Input per Service Unit using the Ecoinvent database In: *International Journal of Performability Engineering*, 10, 357-366

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

Apêndice: quadros com as notas dos modelos de AICV

Quadro 17 - Resultado da avaliação quali-quantitativa dos modelos de caracterização de AICV em nível de RAM para a AoP Recursos

Método de AICV	CED	MIPS	CExD	CEENE	LREx	MEEEx	ICEC/ ECEC	SED	Pegada Ecológica	ReCiPe (água)	Pegada Hídrica
Referência base	VDI (1997); Hischer et al. (2009)	Ritthoff et al. (2002)	Bosch et al. (2007)	Dewulf et al. (2007)	Alvarenga et al. (2013)	Taelman et al. (2014)	Hau e Bakshi (2004); Zhang et al. (2010)	Rugani et al. (2011)	Wackernagel e Rees (1996); Huijbregts et al. (2008)	Goedkoop et al. (2009)	Hoekstra et al. (2011)
Proposta de utilização	Completo	Completo	Completo	Completo	Específico	Específico	Completo	Completo	Completo	Específico	Específico
Critério #1 (Escopo)	Baixo (1)	Médio (3)	Médio (3)	Alto (5)	Baixo (1)	Baixo (1)	Alto (5)	Alto (5)	Médio (3)	Baixo (1)	Baixo (1)
Critério #2 (Robustez científica)	Médio-baixo (2)	Médio-baixo (2)	Médio (3)	Alto (5)	Médio-alto (4)	Médio-alto (4)	Médio-alto (4)	Médio-alto (4)	Médio-baixo (2)	Baixo (1)	Médio (3)
Critério #3 (regionaliz.)	Baixo (1)	Baixo (1)	Baixo (1)	Médio-alto (4)	Alto (5)	Alto (5)	Baixo (1)	Baixo (1)	Baixo (1)	Baixo (1)	Baixo (1)
Nota final	1,4	2,2	2,6	4,8	3,0	3,0	3,8	3,8	2,2	1,0	1,8
Observação	-	-	-	Considerou-se as v1.0, v2.0 e v3.0	Específico para uso da terra	Específico para recursos marinhos	-	-	-	Específico para água	Específico para água