

PARTE II

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS E GESTÃO AMBIENTAL DA AGRICULTURA

*"A melhor maneira de
prever o futuro é criá-lo"*
Peter Drucker

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Marília Ieda da Silveira Folegatti, Anna Leticia Montenegro Turtelli Pighinelli, Fernando Henrique Cardoso, Marcelo Augusto Boechat Morandi, Natalia Crespo Mendes, Nilza Patrícia Ramos, Renan Milagres Lage Novaes, Robson Rolland Monticelli Barizon e Vinícius Gonçalves Maciel

INTRODUÇÃO

Os estudos em Avaliação de Ciclo de Vida da Embrapa Meio Ambiente se iniciaram no ano de 2009, com o projeto Avaliação do impacto ambiental potencial do pinhão manso, matéria-prima para a produção de biodiesel, para as condições brasileiras, usando a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida. A vocação da equipe para pesquisas no setor agroenergético se confirmou em um grande projeto intitulado “Avaliação do Ciclo de Vida da cana-de-açúcar e seus derivados produzidos no Centro-Sul brasileiro, baseada em dados, fatores e modelos adaptados às condições nacionais”, conduzido de 2013 a 2017. Nesse mesmo ano, iniciou-se a intensa participação dessa Unidade da Embrapa na construção de políticas públicas para o setor, em especial a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), além da contribuição na elaboração e atualização de protocolos internacionais dedicados a orientar a contabilidade ambiental da geração e uso de produtos agroenergéticos.

Duas principais linhas de pesquisa se estabeleceram: Contabilidade Ambiental de Produtos Agrícolas e Agroindustriais, com foco em Pegada de Carbono, e Mudança de Uso da Terra. As seções seguintes apresentam essa trajetória.

O QUE É AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA – CONCEITOS, NORMAS ISO 14040 E 14044

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de gestão ambiental que permite avaliar o desempenho ambiental de produtos e serviços. Com uma abordagem sistêmica, a ACV do berço ao túmulo traz a quantificação de potenciais impactos ambientais considerando todo o ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas, produção, distribuição, uso, até a disposição final de um produto. Assim, além da identificação dos estágios do ciclo de vida que mais contribuem para a geração

de impactos, os resultados da ACV permitem identificar e implementar melhorias e integrar aspectos ambientais aos projetos e desenvolvimento de produtos, além de fornecer subsídios para as declarações ambientais de produto (DAP).

Trata-se de uma ferramenta com forte base científica e metodologia reconhecida internacionalmente. Padronizada pelas normas ISO 14040:2006 e 14044:2006 (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b), a ACV possui uma estrutura iterativa composta por quatro fases principais:

1. Definição de objetivos e escopo, em que, além de aplicação e público-alvo, são definidos detalhes como o sistema de produto, unidade funcional, fluxos de referência, fronteiras do estudo, procedimentos de alocação, métodos e tipos de impactos a serem abordados, requisitos de qualidade de dados, entre outros.
2. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV), que envolve a coleta de dados e os cálculos necessários para a construção de um inventário de entradas (materiais, energia e recursos naturais) e saídas (produtos, emissões e resíduos para tratamento) associadas ao sistema de estudo avaliado.
3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), fase na qual os resultados do ICV são convertidos em potenciais impactos ambientais por meio de modelos e indicadores de impacto. Esses modelos e indicadores compõem os métodos de AICV, os quais são selecionados durante a definição do escopo e, de maneira geral, abordam categorias de impacto como: mudanças climáticas, material particulado, recursos bióticos e abióticos, consumo de água, acidificação terrestre, eutrofização (de água doce e marinha), ecotoxicidade (de água doce, marinha e terrestre), toxicidade humana, radiação ionizante, formação de ozônio fotoquímico, depleção da camada de ozônio e uso da terra.
4. Interpretação, etapa em que todos os resultados são compilados a fim de se identificar limitações do estudo, pontos críticos e oportunidades de melhoria, bem como fornecer recomendações.

Estudos de ACV são realizados para diferentes escopos e aplicações, tanto pelo setor acadêmico como pelo industrial e governamental. Diante da relevância e complexidade dos processos agrícolas, as seções seguintes apresentam os desafios e contribuições metodológicas produzidas pela Embrapa Meio Ambiente.

As contribuições contemplam modelos de emissões, procedimentos de alocação, ferramentas para a construção de inventários e bancos de dados tropicalizados, desenvolvidos para suprir necessidades relacionadas, principalmente, à fase de análise do inventário do ciclo de vida, que influencia, conseqüentemente, as demais fases da ACV.

ACV NO AMBIENTE AGRÍCOLA: DESAFIOS, TROPICALIZAÇÃO DE MODELOS AMBIENTAIS E BANCOS DE DADOS

A avaliação de ciclo de vida surgiu como consequência da crise energética da década de 1970 e da publicação do documento “Os Limites para o Crescimento” – um relatório sobre o crescimento exponencial da economia e da população contra uma oferta finita de recursos. Um dos resultados desse movimento foi a demanda por um sistema detalhado para análise da energia requerida para a manufatura de produtos. A ACV ampliou essa análise para incluir não apenas a depleção de recursos energéticos, mas a de outros recursos naturais (materiais), e para incluir os impactos da geração de emissões e resíduos (United Nations Environmental Programme, 1996).

A ACV foi proposta originalmente para processos industriais. Essa técnica implica na contabilização de fluxos de material e energia trocados entre o ambiente onde ocorrem os processos produtivos e o meio ambiente, e pressupõe o fechamento de balanços de massa. Em uma estrutura fisicamente limitada (como a industrial), é possível controlar esses fluxos. Emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos são necessariamente tratados e relatados por força de legislações ambientais.

Já os processos agrícolas (aqui entendidos no sentido amplo, incluindo os processos florestais e pecuários) ocorrem em ambiente aberto. Não há fronteiras físicas entre o ambiente de produção e o ambiente natural. Logo, muitos fluxos de saída não são quantificáveis. Por outro lado, os recursos naturais afetam diretamente e são diretamente afetados pela atividade produtiva. As “condições de produção” são variáveis, especialmente por efeito de fatores climáticos (temperatura e precipitação pluviométrica) e de suas consequências (por exemplo, produtividade, incidência de doenças, dentre outras).

Isso gera uma enorme complexidade. Em estudos de ACV de produtos agrícolas, as saídas dos processos (emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos) são estimadas por modelos, muitos deles dependentes de parâmetros específicos de clima, solo e características de plantas. Também aspectos relativos ao manejo nutricional e fitossanitário precisam ser considerados.

Modelos para estimação de fluxos de saída dos sistemas produtivos para os compartimentos ambientais são apresentados em “guias metodológicas” para estudos de ACV, em geral associadas a bancos de dados de ICV. Podem ser mencionadas as guias: Nemecek; Kägi (2007), Nemecek; Schnetzer (2012), Nemecek et al. (2015), Calvo Buendía et al. (2019), Van Paassen et al. (2019), Koch; Salou (2020).

Essas guias metodológicas reúnem modelos desenvolvidos originalmente para a agricultura de clima temperado, que merecem adequação ou parametrização para melhor representarem a agricultura de clima tropical e subtropical. O primeiro esfor-

ço da Embrapa Meio Ambiente nesse sentido se expressou na guia “Life Cycle Inventories of Agriculture, Forestry and Animal Husbandry: Brazil” (Folegatti-Matsuura; Picoli, 2018), resultado de uma parceria entre Embrapa e ecoinvent Centre. Atualmente, a ICVCalc-Embrapa, ferramenta eletrônica desenvolvida pela Embrapa Meio Ambiente para a elaboração de inventários de processos agrícolas, também traz um módulo com modelos selecionados e parametrizados para o Brasil – a BR-Calc (que será abordada com mais detalhes no tópico **Bancos de dados de inventários de ciclo de vida tropicalizados**).

ENTREGAS DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA: PERFIL AMBIENTAL, ROTULAGEM AMBIENTAL, PEGADA DE CARBONO

Embora um estudo de ACV possa se restringir à análise de inventário de ciclo de vida (ISO, 2006a) – o que permite concluir sobre a quantidade de recursos naturais consumidos e de emissões de potenciais poluentes geradas por um produto –, seu resultado mais elaborado é o perfil ambiental do produto, originário da avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV).

Na AICV, os fluxos de material quantificados no ciclo de vida de um produto são associados a categorias de impactos ambientais selecionadas, por pertinência (etapa de classificação), e são processados cálculos que aplicam os indicadores de categoria de impacto (etapa de caracterização), assim gerando o perfil ambiental (International Organization for Standardization, 2006a). Cada método de AICV contempla um conjunto específico de categorias de impactos ambientais e de modelos ambientais.

Embora a seleção das categorias de impactos ambientais corresponda a uma atividade da definição do escopo de um estudo de ACV, a experiência acumulada tem indicado conjuntos de categorias de impactos mais pertinentes à natureza dos processos agrícolas.

Isso é refletido em uma importante iniciativa da Comissão Europeia, que busca garantir um padrão metodológico para estudos de ACV: a “pegada ambiental de produto”, do inglês *product environmental footprint* (PEF). A PEF reúne os produtos em categorias, para as quais propõe regras, as *product environmental footprint categories rules* (PEFCR), que incluem a indicação de categorias de impactos mais relevantes.

Por exemplo, as regras PEFCR sobre produtos para alimentação animal (*feed for food-producing animals*), que inclui soja (milho e outros grãos), determinam como categorias de impacto mais relevantes: mudanças climáticas, material particulado, acidificação terrestre e de água doce, uso da terra, eutrofização terrestre e escassez de água

(European Commission, 2020). Esse conjunto de categorias de impactos ambientais compõe o perfil ambiental do produto soja.

O perfil ambiental de um produto pode orientar melhorias de processo, com consequente redução de impactos ambientais. Esse tipo de estudo também pode embasar declarações ambientais de produto. Declarações ambientais representam uma forma de comunicar o desempenho ambiental de um produto e têm efeito em relações comerciais.

Muito embora a ACV tenha o diferencial de ser uma ferramenta de avaliação de impactos ambientais holística e sistêmica (FAO, 2022b), tem sido comum sua aplicação como método dedicado a um problema único (“single issue”). O principal exemplo desse emprego da ACV é a pegada de carbono de produtos, que considera apenas a categoria de impacto de mudanças climáticas.

A pegada de carbono de produtos é normatizada pela ISO 14067:2018 (International Organization for Standardization, 2018) e traduzida em muitos protocolos de certificação privados. Também é muito adotada em políticas ambientais, em particular nas políticas para biocombustíveis, como a Renewable Energy Directive (RED), o Renewable Fuel Standard Program (RFS), o Low Carbon Fuel Standard (CARB), e também a Política Nacional para Biocombustíveis (RenovaBio), de cuja construção a Embrapa Meio Ambiente participou ativamente.

AVANÇOS CONQUISTADOS PELA EMBRAPA

Mudança de Uso da Terra em Avaliação de Ciclo de Vida

A mudança de uso da terra (MUT), ou land use change (LUC), em inglês, é um dos processos com maior potencial de impacto nos resultados da ACV de produtos agropecuários. Na categoria de impacto de mudanças climáticas, a MUT pode levar a emissões de gases de efeito estufa (GEE) de 8 a 20 vezes maiores que as emissões de todos os demais processos envolvidos na produção agropecuária (Castanheira; Freire, 2013; Van Middelaar et al., 2013; Poore; Nemecek, 2018). O processo ainda é bastante relevante para outras categorias, como biodiversidade e serviços ecossistêmicos (DeFries et al., 2004; Gavriloiva, 2019). No Brasil, a MUT tem sido responsável por uma parcela considerável das emissões de GEE nacionais, contribuindo para 46% das emissões totais do país em 2020 (SEEG, 2021). Portanto, estimativas acuradas de MUT são críticas para os estudos de ACV de produtos brasileiros e consequentemente para as ações de descarbonização das cadeias de produção.

A mudança de uso da terra pode ser do tipo direta ou indireta (International Organization for Standardization, 2018). A mudança direta (dMUT) ocorre quando há

uma mudança no uso da terra dentro das fronteiras do sistema e a indireta (iMUT), quando há uma mudança fora das fronteiras do sistema, causada por uma mudança direta (International Organization for Standardization, 2018). Por exemplo, quando o objeto de estudo é o cultivo X e o sistema em análise é a fazenda usada para produção desse cultivo, a mudança de uso da terra de pastagem para o cultivo X dentro da fazenda é uma dMUT. Já a mudança de floresta para pastagem na fazenda vizinha pode ser considerada uma iMUT. Em ambos os casos, as mudanças podem levar a emissões ou sequestros de GEE em altos níveis.

A contabilização das emissões de GEE derivadas de dMUT é frequentemente exigida nos protocolos e padrões de ACV internacionais (por exemplo, em ILCD, 2010; Nemecek et al., 2019; dentre outros). No entanto, o levantamento de dados primários para essa tarefa pode ser inviável ou trabalhoso, seja pela falta de dados de alta resolução, seja pelos altos custos e tempo que podem estar associados a essa tarefa (Brenton et al., 2010). Para contornar essa limitação, métodos e ferramentas foram desenvolvidos em nível internacional para disponibilizar estimativas de dMUT para uso em estudos de ACV (por exemplo, em Blonk Consultants, 2021; Lam et al., 2021). No entanto, as estimativas de dMUT eram frequentemente disponibilizadas apenas em nível nacional (por exemplo, em Tubiello et al., 2021) ou apenas para cultivos em recortes regionais e temporais específicos (por exemplo, em Figueirêdo et al., 2013; Maciel et al., 2015) ou continham representações inconsistentes do território brasileiro (por exemplo, em Novaes et al., 2022).

Nesse contexto, a Embrapa Meio Ambiente tem coordenado ações e projetos de pesquisa e desenvolvimento de métodos e estudos que permitam a estimativa mais acurada da mudança de uso da terra para subsidiar estudos de ACV e de pegada de carbono de produtos agropecuários brasileiros. As principais linhas de atuação têm sido: 1) desenvolvimento e aperfeiçoamento do método Brazilian land use change (BRLUC) para estimativas de dMUT para os produtos brasileiros; 2) geração de dados e informações para apoio à consideração de MUT em políticas públicas envolvendo a contabilidade de carbono.

O método BRLUC foi desenvolvido para permitir a estimativa de emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas a uma ampla gama de produtos agropecuários brasileiros, em nível subnacional e compatível com os principais protocolos internacionais. Em sua primeira versão, ele permitia a estimativa de emissões em nível estadual para 64 cultivos, além de pastagem e silvicultura (Novaes et al., 2017). Uma nova versão foi recentemente publicada (Garofalo et al, 2022) e tem os resultados em nível municipal, com base em dados espacialmente explícitos. Ambas as versões estão disponíveis gratuitamente para acesso e download no portal da Embrapa.

Devido a sua consistência e abrangência, os resultados do método foram incorporados ao banco de dados de ACV Ecoinvent (<https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database>),

um dos principais em nível internacional (Donke et al., 2020). Seus dados também foram incorporados no banco de dados internacional GFLI e no Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida SICV-Brasil, gerido pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT/MCTI¹). A incorporação a esses bancos de dados leva automaticamente à adoção do método e de seus resultados pelos seus muitos e variados usuários, que vão desde multinacionais de consultoria e da agroindústria a grandes centros de pesquisa e governos. Essa adoção permite que os estudos que analisem produtos agropecuários brasileiros obtenham resultados mais refinados e acurados sobre o sistema de produção nacional.

Alguns desses estudos têm sido publicados e fornecem uma amostra da amplitude de aplicações do método. São exemplos os estudos sobre: o impacto de rações para peixes (Silva et al., 2018); a pegada de carbono da produção de manga e de sisal no semiárido (Müller-Carneiro et al., 2019; Folegatti-Matsuura et al., 2019), da carne bovina brasileira (Dinato et al., 2019), de coco no nordeste brasileiro (Sampaio et al., 2021) e da soja produzida no Pará (Brito et al., 2021); o desempenho da manufatura de jeans no Brasil (Morita et al., 2020); e efeitos da modelagem sobre a pegada de carbono de biocombustíveis (Brandão et al., 2021). Essa amostra exemplifica a ampla versatilidade do método e sua adoção para os mais diversos fins.

Com base na experiência adquirida nessas ações de pesquisa e desenvolvimento, a Embrapa Meio Ambiente tem também contribuído para o apoio à consideração de MUT em políticas públicas que envolvam a contabilidade de carbono. O principal destaque tem sido a atuação junto ao RenovaBio, da qual resultou a proposta para a definição dos critérios de elegibilidade no programa (Moreira et al., 2018). A equipe também tem contribuído com notas técnicas e informações para políticas internacionais, como para a definição de critérios e parâmetros para avaliação de sustentabilidade no ciclo de vida de biocombustíveis para uso na aviação no Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA) – esquema de redução e compensação de carbono para a aviação internacional – junto à Organização Internacional de Aviação Civil, e para uso marítimo, no International Maritime Organization - Organização Marítima Internacional; e para proposta de fontes de energia renovável na Renewable Energy Directive (RED) – diretiva de energias renováveis – junto à Comissão Europeia. A equipe também atuou recentemente junto à Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) para o ajuste de dados da área agropecuária do Brasil (Novaes et al., 2022), com grande impacto em modelos de MUT globais.

¹ Disponível em: <https://sicv.acv.ibict.br>

Pesticidas em Avaliação de Ciclo de Vida - PestLCI

O Brasil é um dos maiores consumidores de pesticidas do mundo (FAO, 2022a). O impacto do uso dessas substâncias é motivo de grande preocupação, em razão dos riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Tang et al., 2021). O uso excessivo dos pesticidas combinado com práticas agrícolas inadequadas pode resultar em contaminação de compartimentos ambientais, como águas superficiais e subterrâneas, biota aquática, polinizadores e mamíferos terrestres (Mahmood et al., 2016; Uhl; Brühl, 2019; Markert et al., 2020). Para uso seguro dos pesticidas no ambiente agrícola, devem ser seguidas as recomendações previamente estabelecidas em seu rótulo e bula, mediante recomendação técnica de profissional qualificado, de forma a minimizar possíveis impactos.

Nesse sentido, o conhecimento da dinâmica ambiental dessas substâncias e seus potenciais impactos é de suma importância. Essa dinâmica é bastante complexa e envolve inúmeros fatores como as propriedades físico-químicas das moléculas, características edafoclimáticas, além de práticas agrícolas, como o método de aplicação dos pesticidas e de preparo do solo.

Diante desse cenário complexo e interdependente, um dos principais desafios da ACV aplicada a sistemas agrícolas é estimar as emissões de pesticidas para os diferentes compartimentos ambientais e, com isso, quantificar os seus impactos sobre a saúde humana e o meio ambiente (Fantke et al., 2017). Devido à elevada incerteza dos resultados e dos desafios relacionados à avaliação da toxicidade dos pesticidas, muitos estudos de ACV no setor agroalimentar não realizam uma avaliação dos impactos da toxicidade dessas substâncias ou utilizam abordagens bastante simplistas. Isso resulta em uma avaliação incompleta e traz o risco de subestimar potenciais pontos críticos relacionados ao uso dos pesticidas (Gentil et al., 2020).

Para superar esse desafio de estimar emissões de pesticidas de áreas agrícolas para compartimentos ambientais, o modelo PestLCI foi desenvolvido em 2006 na Dinamarca (Birkved; Hauschild, 2006). A base de dados do modelo foi inicialmente desenvolvida para alguns cenários de solo e clima dinamarqueses; é, portanto, de aplicação limitada. Em 2012, foi lançada uma nova versão do modelo, em que os cenários foram expandidos para o continente europeu (Dijkman et al., 2012). Em 2020, após uma série de modificações, foi lançada a versão PestLCI Consensus, disponibilizada em base web (<https://pestlciweb.man.dtu.dk/>). Um dos principais avanços dessa versão foi a possibilidade de inserir novos cenários na base de dados do modelo (Melero et al., 2020). Nas versões anteriores somente era possível utilizar os cenários previamente disponibilizados pelos desenvolvedores do modelo, o que excluía os países de clima tropical.

Diante da possibilidade de incorporar cenários brasileiros à base de dados do PestLCI Consensus e aprimorar os estudos de ACV dos produtos agrícolas, a

Embrapa Meio Ambiente, em parceria com a Fundação Espaço Eco, coordenou um estudo que visou a parametrização de 35 cenários de produção agrícola brasileiros.

Para tanto, os cenários foram selecionados com base em sua representatividade no agronegócio nacional, sendo consideradas as mesorregiões que, somadas, representam 70% do valor da produção agrícola brasileira. Com base na definição das regiões representativas, foi realizado um levantamento das características de seus solos e climas. Como resultado dessa iniciativa, os cenários parametrizados foram inseridos na base de dados do PestLCI e estão disponíveis para todos os usuários de ACV. Os detalhes da parametrização foram disponibilizados em uma publicação, que também traz orientações para o uso do modelo (Barizon et al., 2021).

Com a disponibilização das informações de solo e clima das principais regiões produtoras do agronegócio brasileiro, a expectativa é que os estudos de ACV de sistemas agroalimentares no Brasil possam estimar os impactos dos pesticidas na saúde humana e no meio ambiente com um nível menor de incertezas e, assim, colaborar com sua sustentabilidade.

SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA AGRICULTURA TROPICAL: ALOCAÇÃO

A extensão de terras do Brasil implica em variação considerável nas condições de clima e solo, o que permite a exploração agrícola nas mais diversas regiões, em um mesmo período do ano (mesma safra), além do uso em períodos diferentes do ano, em uma mesma região (safra, safrinha, segunda safra, terceira safra, entre outros). Essa condição diferenciada exigiu o desenvolvimento, ao longo das últimas décadas, de técnicas agrícolas que envolvem desde o monocultivo até a combinação de culturas em sistemas complexos de plantio, como a sucessão, a rotação, o consórcio e a integração (Hirakuri et al, 2012).

O melhor aproveitamento da área é um benefício diretamente percebido ao se adotar os sistemas complexos, mas há ainda aumento de produção, compartilhamento de práticas agrícolas, com seus respectivos insumos e operações, além de benefícios ambientais e sociais (Wagner et al., 2010). Atribuir corretamente as emissões de um insumo compartilhado entre culturas em um sistema de produção complexo, ou ainda quando uma cultura pode proporcionar mais de um produto com valor econômico, é uma dificuldade frequente e inerente à contabilização da pegada ambiental a partir da perspectiva do ciclo de vida. Para isso, a ACV pode utilizar a abordagem de alocação.

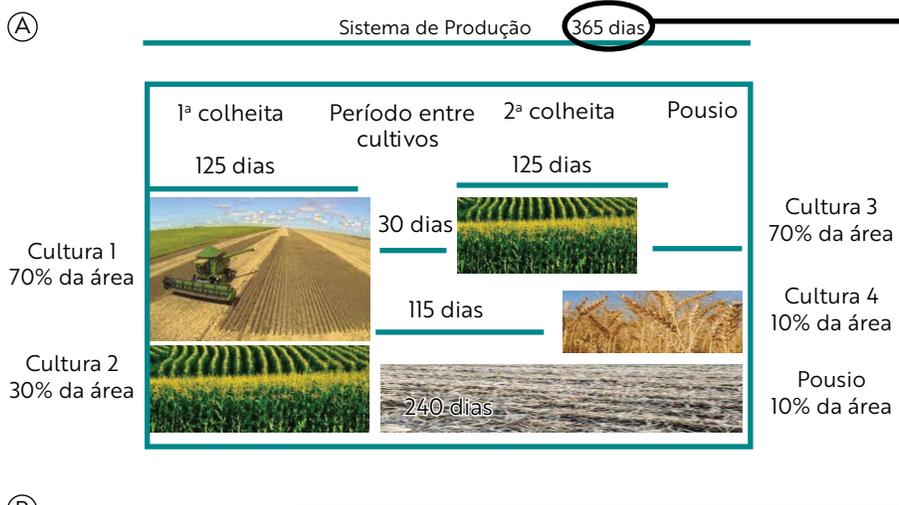
A alocação é definida, segundo a ISO 14040 (International Organization for Standardization, 2006a), como o “particionamento dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e um ou mais outros sistemas de produto”. Portanto, a alocação distribui os fatores de impacto en-

tre o produto de referência e os coprodutos, quando são simultâneos e dependentes. Cabe destacar que a recomendação primária da norma é de evitar a alocação, sempre que possível, devido ao alto grau de incerteza da atribuição das cargas. Assim, sugere-se optar pela subdivisão do sistema em subprocessos com dados específicos ou pela expansão do sistema de produto, para incluir a funcionalidade mais ampla dos coprodutos, no objetivo principal do estudo (International Organization for Standardization, 2006a). Nos casos em que a alocação não pode ser evitada, os métodos recomendados são baseados em critérios físicos (relação física subjacente entre entradas/saídas e as emissões geradas) ou econômicos (valor de mercado); destaca-se que a alocação econômica está sujeita às flutuações de preços do mercado, por isso é utilizada somente quando não há outra possibilidade (International Organization for Standardization, 2006a).

Na ACV de produtos agrícolas é comum que a alocação não possa ser evitada e a recomendação é priorizar a adoção da relação física entre os produtos e coprodutos. Nessa abordagem, a fração das cargas ambientais atribuída a um produto é calculada com base em algum atributo físico, como massa, volume, energia, área ocupada ou a combinação de área e tempo de ocupação (área-tempo).

Considerando que grande parte das culturas agrícolas, no Brasil, é produzida em sistemas complexos, a equipe de ACV da Embrapa Meio Ambiente propôs uma estratégia de alocação que considera, simultaneamente, a área e o tempo de ocupação de cada cultura em um ciclo completo de produção.

Na Figura 10.1A é possível observar um exemplo de um ciclo de cultivo de 1 ano agrícola (365 dias), em que há cultivo de verão de soja e milho, seguido de uma safriinha de milho, de uma safra de inverno de trigo e de parte da área em pousio. Assim, considerando-se as respectivas áreas e tempos de ocupação e a realização de uma operação de preparo do solo em área total antes do plantio da safra, todas as emissões relativas a essa operação seriam divididas para os cultivos que se beneficiassem de seu uso, inclusive para o pousio, que posteriormente teria sua fração proporcionalmente dividida entre as culturas de interesse econômico (Figura 10.1B).



(B)

1							
2	Anos do sistema de produção						
3	Data do plantio da primeira cultura do sistema de produção	10/10/2020					
4	Data da colheita da última cultura do sistema de produção	10/10/2021					
5	Total de dias	365					
6	Total de anos	1,00					
7							
8							
9	Culturas	% Area	dias_entrada	dias_default (Sistema de produção)	Carga para cultura	Tratamento da carga	Fator de Alocação
10	soja (cultura 1)	70,00%	125	125	0,240	Recebe carga	0,3889
11	milho (cultura 2)	30,00%	125	125	0,103	Recebe carga	0,1667
12	milho (cultura 3)	70,00%	125	125	0,240	Recebe carga	0,3889
13	trigo (cultura 4)	10,00%	125	125	0,034	Recebe carga	0,0556
14	Pastagem			240	0,000	Selecionar	0,0000
15	Cultura de cobertura				0,000	Selecionar	0,0000
16	Pousio	10,00%		240	0,066	Doa cargas	0,0000
17	Período entre cultivos				0,318		

Figura 10.1. Ilustração de um sistema de rotação de culturas que ocupa um ano agrícola (A) e do cálculo de alocação entre as culturas participantes do sistema, usando a ICVCalc (B).
Fonte: Nilza Patrícia Ramos.

Nemecek et al. (2001) relatam o uso da distribuição das cargas relativas ao pousio entre culturas do sistema de produção, para estudos de ACV, independentemente de seu interesse econômico. Já nos estudos da Embrapa Meio Ambiente, a estratégia de alocação baseada em área-tempo tem priorizado a distribuição das cargas de pousio

apenas entre as culturas de interesse econômico, o que exclui as culturas de cobertura. Essas últimas favorecem o sistema de produção como um todo, fornecendo biomassa que recobre a superfície do solo em períodos de entressafra, com a finalidade de evitar erosão e crescimento de plantas daninhas (Alcântara et al., 2000; Perin et al., 2004). Essa é uma situação muito comum no Brasil, mas não em outros países, o que justifica a abordagem proposta pela Embrapa. No entanto, a literatura ainda é controversa, com relatos de atribuição ou não de cargas às culturas de cobertura (Costa et al. 2020), pois, apesar dos benefícios citados, a presença de resíduos em campo pode emitir óxido nitroso, que tem alto potencial de aquecimento global (Joint Research Centre, 2011). Cabe destacar que a decisão sobre como alocar cargas ambientais em sistemas de produção depende, obviamente, do objetivo e escopo do estudo de ACV.

O impacto do uso dessa estratégia de alocação nos resultados de ICV e nos estudos de ACV de produtos agrícolas cultivados em sistemas complexos pode ser visualizado na Tabela 10.1. Nota-se que, a depender do insumo, da operação ou do processo que as culturas dividem, o efeito nas emissões pode ser maior ou menor em uma determinada categoria de impacto da ACV. Para o caso do amendoim, Ramos et al. (2016) verificaram que o cultivo em sucessão com pastagem poderia reduzir em 15% o impacto na categoria de mudanças climáticas – isso porque, de um total de dez operações utilizadas no preparo do solo para se cultivar amendoim, oito podem beneficiar também a pastagem que, segundo essa estratégia, passa a compartilhar as emissões das operações com o amendoim.

Tabela 10.1. Redução nos impactos para diferentes categorias, em função do uso da alocação em sistemas de rotação, sucessão e integração entre culturas agrícolas.

Sistema	Mudanças climáticas	Acidificação terrestre	Eutrofização terrestre	Eutrofização da água doce	Referência
Rotação soja/girassol em relação ao girassol solteiro	↓43%	↓26%	↓9%	↓7%	Matsuura et al., 2017
Integração etanol/carne bovina em relação aos dois isolados	↓0,5%	↓2%	↓2%	-	Picoli et al., 2020
Sucessão amendoim/pastagem em relação ao amendoim solteiro	↓15%	↓23%	↓2%	↓15%	Ramos et al., 2021

Outro uso da alocação, além do empregado em sistemas de produção, envolve a necessidade de distribuição de cargas entre produtos e coprodutos de um processo de produção. Nesse caso, um exemplo que merece ser mencionado é o da construção da *RenovaCalc*, ferramenta de cálculo da nota de eficiência energético-ambiental dos biocombustíveis brasileiros que participam da *RenovaBio*. Nessa ferramenta, a equipe da Embrapa Meio Ambiente e seus parceiros optaram pelo uso da alocação

energética para dividir as emissões de GEE do ciclo de vida dos biocombustíveis entre esses e seus coprodutos (Folegatti-Matsuura et al., 2018). Assim, no caso do etanol de cana-de-açúcar, a intensidade de carbono é dividida com o açúcar e a energia elétrica gerados na usina, após a conversão de todos esses produtos em base energética (MJ). Se a alocação energética não fosse adotada, só restaria a opção da alocação econômica para abarcar a energia elétrica como coproduto – que é extremamente importante para a matriz energética nacional (BEM, 2021). O mesmo princípio é aplicado no caso do biodiesel e do etanol de milho.

Em linhas gerais, mesmo existindo controvérsias e questionamentos a respeito do uso da alocação em estudos de ACV e ainda mais polêmicas sobre a escolha do método a ser utilizado, entende-se que pode ser necessário utilizar esse procedimento para dividir cargas ambientais. Como a escolha do método afeta significativamente resultado da ACV, é fortemente recomendável realizar a análise de incertezas e de sensibilidade para determinar as consequências das escolhas de alocação (ILCD, 2010). Não há consenso na comunidade científica sobre qual alternativa deve prevalecer (Costa et al., 2020).

Bancos de dados de inventários de ciclo de vida tropicalizados

Inventário do Ciclo de Vida (ICV), segundo a ISO 14040:2006 (International Organization for Standardization, 2006a), é a “compilação e quantificação de entradas e saídas através do ciclo de vida de um produto”. As “entradas”, correspondem a materiais ou energia extraídos da natureza. As “saídas” correspondem a emissões (gasosas, líquidas e sólidas) para o meio ambiente, potencialmente poluentes. “Ciclo de vida são estágios consecutivos e interligados de um sistema de produto, desde a aquisição ou geração de matéria-prima a partir de recursos naturais até a sua disposição final” (International Organization for Standardization, 2006a). Em outras palavras, o ICV contabiliza a troca direta de material e energia com o meio ambiente, em todos os processos do ciclo de vida de um produto.

Um ICV é composto por inventários de processo, armazenados em bancos de dados e vinculados entre si com o apoio de programas computacionais de ACV. Os inventários de processo, por sua vez, contabilizam o material e a energia envolvidos em um processo produtivo. O processo é quantitativamente caracterizado pelo inventário, que reflete seu escopo tecnológico, geográfico e temporal.

Para que um estudo de ACV tenha qualidade, os inventários de processo devem bem representar a realidade. Para processos agrícolas em ambiente tropical e subtropical, em um país das dimensões do Brasil, isso representa um grande desafio, devido a alguns fatores:

- a. Natureza da agricultura, onde os recursos naturais afetam diretamente e são diretamente afetados pela atividade produtiva. As características do ambiente

são fatores determinantes da capacidade produtiva e da qualidade dos produtos nele gerados; por outro lado, também definem a vulnerabilidade desse ambiente.

- b. Grande extensão territorial nacional, coberta por seis diferentes biomas, com enorme diversidade de clima, solo e recursos biológicos. Também a geografia humana é diversa, implicando em diferentes níveis de acesso à informação, à tecnologia, a recursos financeiros e a outros recursos. Ainda, a escala de produção é altamente variável.
- c. Dificuldade de definir recortes geográficos representativos (áreas homogêneas, quanto a clima, solo e nível tecnológico) e a eles associar dados qualificados de diferentes naturezas (estatísticos, derivados de sistema de informação geográfica, técnicos agrônômicos, dentre outros).
- d. Inadequação dos modelos para estimação de emissões do ambiente produtivo para os compartimentos ambientais, originalmente desenvolvidos para a agricultura de clima temperado. Idealmente, novos modelos precisam ser propostos para melhor representar os processos biofísicos das regiões agrícolas brasileiras. Merecem adequações os parâmetros: edafoclimáticos, agrônômicos, referentes à composição química da biomassa, dentre outros.
- e. Prática de sistemas de produção mais complexos, possibilitados por características climáticas, sendo viáveis várias safras em um mesmo ano agrícola. Largo emprego do plantio direto, com várias implicações no manejo das culturas.
- f. Especificidade de alguns insumos empregados na agricultura brasileira, como os corretivos de solo (altamente exigidos em solos muito intemperizados), fertilizantes organominerais (cuja composição é dependente da disponibilidade e qualidade da fração orgânica que os compõem), pesticidas (cuja demanda é afetada por condições climáticas), dentre outros.
- g. Fronteira agrícola ainda em expansão, com um grande dinamismo na MUT.

Até meados da década de 2010, havia poucos bancos de dados de inventários de ciclo de vida (BD-ICV) com inventários de processos agrícolas e com inventários brasileiros. O banco de dados Ecoinvent, ainda hoje o principal banco de dados dessa natureza, continha apenas quatro inventários de processos brasileiros (energia elétrica, soja, cana-de-açúcar e madeira de Araucária). Uma iniciativa financiada pela Secretaria de Relações Econômicas do Governo Suíço (Swiss State Secretariat for Economic Affairs) e intervenida pelo ecoinvent Centre, buscou popular esse banco de dados com inventários de processos regionalizados – e o Brasil foi um dos países eleitos.

Nessa oportunidade, ocorreu a maior contribuição brasileira a um banco de dados internacional de ICV. A Embrapa publicou mais de 130 inventários de processos

agrícolas, pecuários e agroindustriais, incluindo algumas das principais commodities brasileiras – soja, milho, cana-de-açúcar, eucalipto e derivados; pecuária bovina de corte; e manga e derivados (como representante da fruticultura tropical de exportação). Também foram publicados mais de 400 conjuntos de dados de MUT, representando a integração do modelo BRLUC, de autoria da Embrapa, àquele banco de dados.

Grande parte desses inventários (54) foi adequada ao padrão de qualidade Quali-Data (Rodrigues et al., 2016) e convertida ao formato eletrônico (ILCD) do SICV-Brasil. Essa foi a maior contribuição recebida por esse banco de dados desde sua operacionalização, em 2015. Naquele momento, inclusive, a Embrapa contribuiu com a oferta do primeiro conjunto de dados do SICV-Brasil. Essa parceria se mantém ativa: em 2021, foram publicados novos inventários de importantes produtos agrícolas de exportação: café (8), amendoim e derivados (9). Cabe destacar que o SICV-Brasil é um banco de dados público, de acesso gratuito e, embora nacional, é um dos provedores da plataforma internacional Global LCA Data Access (GLAD) – a Rede Global de Acesso a Dados de ACV, em português (Nascimento et al., 2020).

Atualmente, a Embrapa também colabora com o banco de dados do Global Feed LCA Institute (GFLI²), orientado a conjuntos de dados para a produção animal. Em 2022, foi publicada, no GFLI e no Ecoinvent, uma atualização dos inventários de soja, milho, cana-de-açúcar e derivados.

A elaboração do inventário é a etapa de um estudo de ACV que consome mais tempo e recursos. Sua boa consecução depende do conhecimento profundo do processo produtivo que se quer representar, e também de suas interações com o meio ambiente. Requer uma equipe multidisciplinar que, no caso de produtos agrícolas, domine as áreas de fitotecnia, fitopatologia, nutrição de plantas, além das áreas de modelagem ambiental e ACV.

Povoar BD-ICV significa fazer chegar a diversos públicos (acadêmicos, profissionais da área de sustentabilidade, gestores públicos) informações qualificadas para estudos de ACV dedicados à melhoria de produtos e processos, a subsídios a declarações ambientais, à promoção de compras sustentáveis, ao embasamento a políticas públicas ambientais. Significa promover uma agricultura mais sustentável – o que é prioridade na agenda de empresas e governo.

Ferramentas para Avaliação de Ciclo de Vida: RenovaCalc, ICVCalc, AgriOp

Além da contribuição dada pela Embrapa Meio Ambiente para a construção ou povoamento de BD-ICV, que são a base para estudos de ACV, essa unidade também

² Disponível em: <https://globalfeedlca.org/gfli-database/>

tem dedicado esforços ao desenvolvimento de ferramentas computacionais para elaborar inventários de processos agrícolas, para estimar a pegada de carbono de produtos e ferramentas acessórias, apresentadas a seguir.

RENOVACALC

Como citado anteriormente, a RenovaBio é a Política Nacional de Biocombustíveis, que foi instituída pela Lei 13.576/2017. O principal objetivo dessa política é ampliar a participação dos biocombustíveis na matriz de transportes brasileira, com base na previsibilidade e na sustentabilidade econômica, ambiental e social, contribuindo ainda para a redução das emissões de GEE no país. É uma política de Estado, voltada à descarbonização do setor de transporte, em linha com os compromissos que o Brasil assumiu mundialmente na Conferência do Clima, em Paris (2015).

Para a operacionalização da RenovaBio, a Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Ministério de Minas e Energia (SPG/MME) demandou à Embrapa Meio Ambiente o desenvolvimento de uma ferramenta que fizesse a contabilidade de carbono dos biocombustíveis participantes do programa. Essa ferramenta recebeu o nome de RenovaCalc. O desenvolvimento da RenovaCalc se iniciou em janeiro de 2017, quando a equipe da Embrapa buscou parcerias com a Unicamp (Universidade Estadual de Campinas), o LNBR (Laboratório Nacional de Biorrenováveis) – CTBE, à época – e Agroicone. Após 14 meses de trabalho conjunto, em fevereiro e março de 2018, a primeira versão da ferramenta foi validada junto ao setor produtivo, em evento que contou com representantes dos setores sucroenergético, do biodiesel, bioquerosene de aviação e biogás. Atualmente há nove rotas tecnológicas de produção listadas na RenovaCalc (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022).

O desenvolvimento da RenovaCalc foi embasado na metodologia de ACV. Para a RenovaBio foi assumida a abrangência “do poço à roda”, que contabiliza todos os fluxos de material e energia consumidos pelos processos produtivos e emitidos para o meio ambiente, desde a extração de recursos naturais, aquisição ou produção e tratamento da biomassa, sua conversão em biocombustível, até sua combustão em motores, incluindo todas as fases de transporte. Embora a ACV considere várias categorias que caracterizam o perfil ambiental de um produto, como o objetivo da RenovaBio é promover a redução da emissão de gases de efeito estufa, foi eleita apenas a categoria de impacto “mudanças climáticas” (Folegatti-Matsuura et al., 2022)³.

³ FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; CARDOSO, F. H.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; RAMOS, N. P.; MORANDI, M. A. B.; MACIEL, V. G.; GAROFALO, D. T.; NOVAES, R. M. L.; SHIOSAWA, M. L.; NASCIMENTO, G. C. *Workbook for life cycle inventories of agricultural products, according to different methodological guides*. Jaguariúna: Embrapa, 2022. No prelo.

A RenovaCalc tem alguns diferenciais em relação a outras ferramentas para contabilidade de carbono de biocombustíveis: 1) permite trabalhar com dados primários, expressando o perfil específico do produtor de biocombustíveis; 2) apresenta toda a estrutura de cálculo aberta, para conhecimento público; 3) opera no software Microsoft Excel, de domínio geral. Essas características permitem que pessoas sem o embasamento teórico em ACV possam utilizar e compreender os cálculos processados e os resultados obtidos.

Em linhas gerais, a RenovaCalc apresenta dois conjuntos de dados a serem preenchidos pelo usuário: dados agrícolas de produção das biomassas e dados industriais da produção dos biocombustíveis. Para a fase agrícola de produção, são informadas as quantidades de insumos agrícolas consumidos, como corretivos, fertilizantes, diesel, eletricidade, além de volume de produção e área cultivada. Para a fase industrial, são demandados dados de rendimentos dos produtos e coprodutos, além dos consumos de combustíveis sólidos e líquidos e outros insumos necessários para produção dos biocombustíveis.

Após o preenchimento dos dados, a RenovaCalc estima as emissões de "background" relacionadas às etapas do ciclo de vida anteriores à etapa agrícola de produção, adotando o banco de dados ecoinvent e as emissões dos processos agrícola e industrial.

A RenovaCalc apresenta o total dessas emissões em g CO₂eq/MJ do biocombustível, e por fase do ciclo de vida (agrícola, industrial, transporte e uso do biocombustível). A emissão total do biocombustível, ou intensidade de carbono (IC), é subtraída da IC de seu combustível fóssil equivalente (por exemplo, gasolina, no caso do etanol; ou diesel, para o biodiesel), resultando na Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA), que representa a mitigação das emissões de GEE.

Com base na NEEA são calculados os Créditos de Descarbonização (CBios), negociados em bolsa de valores (na plataforma da B3), que correspondem a um novo produto para as usinas de biocombustíveis. Quanto mais eficientes os processos produtivos, maior a NEEA, mais CBios as usinas poderão comercializar e maior seu ganho econômico. Cada CBio corresponde a uma tonelada de CO₂eq evitada. Com a "aposentadoria" dos CBios, efetiva-se a mitigação de emissões de GEE prevista nas metas anuais da RenovaBio.

ICV CALC-EMBRAPA

A ICVCalc-Embrapa é uma ferramenta desenvolvida no software Microsoft Excel com o objetivo principal de construir inventários de ciclo de vida de processos agrícolas para estudos de ACV.

Abrangendo os principais protocolos metodológicos internacionais, a ICVCalc estima as emissões derivadas dos processos agrícolas para os diferentes compartimen-

tos ambientais, de tal forma que o usuário pode facilmente comparar os resultados das emissões entre os diferentes protocolos, ainda em nível de inventário.

A lógica proposta pela ferramenta é que o usuário tenha duas opções de inserção de dados: a) dados brutos ou b) dados previamente tratados. Na escolha da primeira opção, os dados são inseridos e tratados na planilha “PrimaryData”, destinada à inserção dos dados referentes à produção de uma cultura agrícola em uma safra, e na planilha “Allocation”, para culturas participantes de sistemas de produção, dedicada aos cálculos de alocação de cargas ambientais relacionadas ao consumo de insumos e operações agrícolas que são compartilhados entre os produtos agrícolas desse sistema. Já na segunda opção, na planilha “InputData”, o usuário insere os dados referentes à quantidade do fluxo (recursos da natureza ou da tecnosfera), na unidade de um hectare ou um quilograma de produto, previamente tratados fora da ferramenta.

Os protocolos metodológicos para o cálculo de emissões para processos agrícolas contidos na ICVCalc são a) Nemecek (Nemecek ; Schnetzer, 2012); b) WFLDB (Nemecek et al., 2015); c) Agri-footprint (Van Paassen et al., 2019); d) Agribalyse (Koch; Salou, 2020); e) IPCC (Calvo Buendia et al., 2019) e f) BR-Calc. Esse último foi desenvolvido pela Embrapa Meio Ambiente por meio da customização dos modelos presentes em outros protocolos que melhor representam os processos da agricultura brasileira, e inclui bancos de dados de clima e solo para as mesorregiões do país.

Para a melhor interação ferramenta-usuário, cada protocolo dispõe de duas planilhas: a) Calc, dedicada à inserção de parâmetros técnicos que alimentam os modelos ambientais específicos e, por vezes, exclusivos daquele protocolo em questão; b) LCI, destinada à exibição dos fluxos de entrada e saída (estimados pelo protocolo específico), que compõem o inventário completo do processo agrícola.

Na ICVCalc há ainda a planilha de “Emission Comparison”, que exhibe os resultados de emissões para os diversos compartimentos ambientais (ar, águas subterrâneas e superficiais, solo agrícola e natural) de acordo com cada protocolo que se escolheu trabalhar. Assim, é possível analisar as semelhanças e disparidades dos resultados obtidos, para maior robustez do estudo de ACV.

AGRIOP

A AgriOp é uma ferramenta que faz parte da ICVCalc-Embrapa e é utilizada para modelar as operações agrícolas em estudos de ACV. Existem três formas de o usuário modelar suas operações agrícolas, a depender dos seus dados disponíveis.

Em primeiro lugar, na falta de dados primários relacionados à quantidade de diesel consumido e especificações do maquinário agrícola, recomenda-se utilizar o Tier 1, em que o usuário não fará qualquer modelagem, mas irá utilizar as operações agrícolas já existentes nas bases de dados do Ecoinvent.

Na segunda opção, quando o usuário tem dados de consumo de diesel para as operações agrícolas realizadas no sistema de produção que está sendo modelado, poderá optar pelo Tier 2. Basta informar, para cada operação agrícola, a quantidade de diesel consumida, bem como a porcentagem de biodiesel no combustível comercial utilizado, e a ferramenta apresentará o cálculo das emissões de 20 substâncias relacionadas à queima do combustível (Nemecek; Kägi, 2007).

A terceira opção da AgriOp é a modelagem por Tier 3. Essa opção é recomendada para quando o usuário tiver os dados primários relacionados aos maquinários agrícolas, tais como modelo e especificações técnicas (potência do motor, tamanho e tipo do implemento), rendimento operacional da máquina em hectare/hora e consumo de combustível. Além de fazer os cálculos das emissões devido à combustão do diesel, a ferramenta fará os cálculos relacionados à infraestrutura (isto é, quantos quilogramas de máquinas e implementos foram consumidos para se operar um hectare). O usuário, de posse dos fluxos de saída estimados pelo Tier 3 da AgriOp, será capaz de modelar em software de ACV uma operação agrícola "customizada", que represente mais fielmente seu sistema de produção (ao invés de usar uma operação já existente nas bases de dados, como no Tier 1). Essa modelagem conta com um grande diferencial, que é uma base de dados de maquinário agrícola, contendo parâmetros técnicos das máquinas e implementos, dados necessários para os cálculos relacionados à infraestrutura.

Para exemplificar, pode-se assumir que o usuário queira modelar uma operação de gradagem niveladora, utilizando uma grade de 40 discos e um trator de 250 cv. Para isso, basta selecionar essa opção de grade na lista pré-estabelecida da AgriOp, inserir a potência do trator, e a ferramenta automaticamente estimará a massa do trator. Como resultado, a AgriOp dará o perfil da operação agrícola necessário para a modelagem em software de ACV.

Desafios e perspectivas

A emergência climática e a necessidade de avançar no desenvolvimento sustentável, representados pelos compromissos assumidos no Acordo de Paris e no alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), requerem mudanças significativas nos sistemas agroalimentares. Qualquer novo padrão tecnológico terá de se nortear pela consolidação de sistemas de produção limpos, com balanço positivo de carbono, adoção de práticas de manejo adequadas a solos tropicais, investimentos na conservação e uso da biodiversidade e que integrem as cadeias, promovam a inclusão produtiva e gerem e remunerem as externalidades positivas.

Se no passado o aumento da produção era baseado na ampliação de área sem maior preocupação com as consequências ambientais e sociais, hoje o crescimento da

agricultura está pautado pelo ganho de desempenho e pela preocupação com o meio ambiente. Assim, os avanços em produtividade garantem efeitos poupa-recursos. Essa sustentabilidade concreta, mensurável e precificável entrou, definitivamente, na agenda dos sistemas agroalimentares globais.

Hoje, o Brasil é referência em ciência e tecnologia para a agricultura tropical. A safra de grãos do país ultrapassa os 250 milhões de toneladas, enquanto o uso da terra gira em torno de 30% do território nacional para produção agropecuária, aqui incluindo, grãos, frutas, hortaliças, culturas perenes, culturas energéticas, fibras e produção de proteína animal. É, portanto, imenso o potencial de crescimento do agronegócio brasileiro. Em todos os casos, a área plantada cresceu menos do que a produção, evitando mudança maior de uso da terra.

Os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil em relação ao clima oferecem oportunidades também no setor de biocombustíveis e energia de biomassa. A matriz energética brasileira já contempla importante participação de energias renováveis. Entretanto, para o cumprimento das metas assumidas, há clara necessidade de uma efetiva transição para economia de baixo carbono, reduzindo as emissões devido à queima de combustíveis fósseis.

O Brasil tem um arcabouço legal e de políticas públicas ambientais robusto, que inclui o Plano Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC), a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), o Programa Nacional de Solos do Brasil (Pronasolos), o Programa Nacional de Bioinsumos, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, a ratificação do Acordo de Nagoia sobre biodiversidade e outros marcos importantes.

Há ainda o Código Florestal que, mesmo ainda carecendo de plena implementação, é um balizador sem igual, pois permite haver Áreas de Preservação Permanente (APP) e de Reserva Legal (RL) convivendo com a área produtiva dentro das fazendas.

Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento e aprimoramento de métricas de avaliação de impactos que permitam destacar as vantagens competitivas da agricultura tropical e indicar os pontos de melhoria, rumo à descarbonização e minimização de outros impactos ambientais.

A ACV, por sua completude, transparência, robustez e credibilidade científica, tem se tornado a base para muitas certificações e para o estabelecimento de critérios que hoje se configuram como barreiras não tarifárias para inserção em mercados internacionais e para investimentos.

Entre os principais desafios para o avanço da aplicação da ACV na agricultura tropical, destacam-se:

- a. Aprimoramento de modelos e ferramentas para Mudança de Uso da Terra, incluindo a melhoria nas fontes de dados sobre a dinâmica do uso da terra, bem como nos dados de estoques de carbono no solo e biomassa.

- b. Aprimoramento de modelos de dispersão e fatores de emissão para substâncias originárias dos processos agropecuários e destinadas aos compartimentos ambientais, nas condições de solo e clima tropical, considerando a complexidade dos sistemas produtivos.
- c. Geração e inserção de dados de inventários de ciclo de vida atualizados em fóruns e bancos de dados internacionais para as principais cadeias de produtos e insumos agropecuários, que permitirão assegurar ao país maior confiabilidade na elaboração de inventários e avaliações de impacto. A geração de dados confiáveis e com credibilidade é essencial para garantir a competitividade da agropecuária brasileira e desmistificar uma imagem equivocada ou enviesada, corrigindo erros de rumo interno em nossas políticas públicas e iniciativas tanto de governo quanto do setor produtivo.
- d. Disponibilização de ferramentas de apoio à ACV.
- e. Geração da pegada de carbono e perfil ambiental dos principais produtos de exportação brasileiros.
- f. Integração das ferramentas de ACV com outros critérios e indicadores de sustentabilidade, incluindo a valoração das reservas de vegetação nativa associadas às paisagens rurais brasileiras.
- g. Disseminação da cultura de ACV nas cadeias agroalimentares, permitindo a integração e harmonização dos dados e da comunicação de impactos e externalidades.

A Embrapa Meio Ambiente, que desenvolve estudos de ACV para sistemas agropecuários desde 2009, destaca-se como referência sobre o tema no Brasil. A geração dos inventários e ferramentas, como as apresentadas neste capítulo, tem proporcionado uma intensa procura por parcerias em projetos. Além dos grãos e culturas energéticas, há a perspectiva de ampliação dos estudos para outras cadeias, incluindo fruteiras, pecuária e outros produtos de importância como café, amendoim e cacau.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo trouxe uma breve apresentação de algumas das demandas relacionadas a métricas e ferramentas de gestão aplicadas à avaliação de impactos ambientais da agricultura, e de como a Embrapa Meio Ambiente tem dedicado esforços para a construção de conhecimentos e ativos tecnológicos para o seu enfrentamento. Um bom caminho já foi trilhado, mas os desafios com os quais o País se defronta são enormes e continuam exigindo nossa dedicação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RenovaBio**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio>. Acesso em: 02 abr. 2022.
- ALCÂNTARA, F. A.; FURTIN NETO, A. E.; PAULA, M. B.; MESQUITA, H. A.; MUNIZ, J. A. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um latossolo vermelho-escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 2, p. 277-288, 2000.
- AMBROSANO, J. A.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A.; DIAS, F. L. F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; SACHS, R. C. C.; ZACÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 810-818, 2011.
- BARIZON, R. R. M.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; SCACHETTI, M. T.; SILVA, G. B. S. da; COSTA, M. P.; GAROFALO, D. F. T.; LANES, V. F. de; PICOLI, G.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; MORANDI, M. A. B. **Modelo PestLCI**: parametrização para os cenários brasileiros de produção agrícola. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2021. 30 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 132). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1134598>. Acesso em: 25 jan. 2021.
- BIRKVED, M.; HAUSCHILD, M. Z. PestLCI: a model for estimating field emissions of pesticides in agricultural LCA. **Ecological Modelling**, v. 198, p. 433-451, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.05.035>.
- BLONK CONSULTANTS. LUC Impact Tool. **Full Dataset version 2021**. The Netherlands: Blonk Consultants, Gouda, 2021.
- BRANDÃO, M.; AZZI, E.; NOVAES, R. M.; COWIE, A. The modelling approach determines the carbon footprint of biofuels: the role of LCA in informing decision makers in government and industry. **Cleaner Environmental Systems**, v. 2, 100027, 2021.
- BRENTON, P.; EDWARDS-JONES, G.; JENSEN, M. F. **Carbon footprints and food systems**: do current accounting methodologies disadvantage developing countries? Washington: The World Bank Publications, 2010. 71 p. (World Bank Study, 56798).
- BRITO, T.; FRAGOSO, R.; MARQUES, P.; FERNANDES-SILVA, A.; ARANHA, J. LCA of soybean supply chain produced in the state of Pará, located in the Brazilian Amazon biome. **Biology and Life Sciences Forum**, v. 3, n. 1, p. 1-7, 2021.
- BUENDÍA, E. C.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R. **Climate change and land**: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva: IPCC, 2020. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.
- CASTANHEIRA, E. G.; FREIRE, F. Greenhouse gas assessment of soybean production: implications of land use change and different cultivation systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, n. 1, p. 49-60, 2013.

COSTA, M. P.; CHADWICK, D.; SAGET, S.; REES, R. M.; WILLIAMS, M.; STYLES, D. Representing crop rotations in life cycle assessment: a review of legume LCA studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 25, p. 1942–1956, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01812-x>.

DeFRIES, R. S.; FOLEY, J. A.; ASNER, G. P., 2004. Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers. Ecology and the Environment*, v. 2, n. 5, p. 249–257, 2004.

DIJKMAN, T. J.; BIRKVED, M.; HAUSCHILD, M. Z. PestLCI 2.0: a second generation model for estimating emissions of pesticides from arable land in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, p. 973–986, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0439-2>.

DINATO, R.; PICOLI, J. F.; FERNANDES, M.; KISS, B.; CHRYSsafIDIS, J. **Pegada de carbono da carne bovina brasileira exportada para a união européia**: resultados e premissas para o cálculo das emissões do ciclo de vida do produto. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas, 2019. 151 p.

DONKE, A. C. G.; NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A. Integrating regionalized Brazilian land use change datasets into the ecoinvent database: new data, premises and uncertainties have large effects in the results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 25, p. 1027–1042, 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **PEFCR feed for food producing animals**: version 4.1, abril 2018: data of expiration 31st December 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_feed.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.

FANTKE, P.; ANTÓN, A.; GRANT, T.; HAYASHI, K. Pesticide emission quantification for life cycle assessment: A global consensus building process. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 13, p. 245–251, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3370/lca.13.245>.

FAO. **FAOSTAT**. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commoditymoraes. Acesso em: 10 jan. 2022a.

FAO. **FAO Term Portal**: life cycle assessment. Disponível em: <https://www.fao.org/faoterm/viewentry/en/?entryId=168005>. Acesso em: 08 mar. 2022b.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. de; KROEZE, C.; POTTING, J.; BARROS, V. da S.; ARAGÃO, F. A. S. de; GONDIM, R. S.; SANTOS, T. de L.; BOER, I. J. M. de. The carbon footprint of exported brazilian yellow melon. *Journal of Cleaner Production*, v. 47, p. 404–414, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.015>.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; CARDOSO, F. H.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; RAMOS, N. P.; MORANDI, M. A. B.; MACIEL, V. G.; GAROFALO, D. T.; NOVAES, R. M. L.; SHIOSAWA, M. L.; NASCIMENTO, G. C. **Workbook for life cycle inventories of agricultural products, according to different methodological guides**. Jaguariúna: Embrapa, 2022. No prelo.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; DIAS, F. T.; PICOLI, J. F.; LUCAS, K. R. G.; DE CASTRO, C.; HIRAKURI, M. H. Life-cycle assessment of the soybean-sunflower production system in the Brazilian Cerrado. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. v. 22, p. 492–501, 2017. DOI 10.1007/s11367-016-1089-6.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; PICOLI, J. F. **Life Cycle Inventories of Agriculture, Forestry and Animal Husbandry - Brazil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 2018. 143 p.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; SCACHETTI, M. T.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; MOREIRA, M. M. R.; BONOMI, A.; BAYMA, G.; PICOLI, J. F.; MORANDI, M. A. B.; RAMOS, N. P.; CAVALETT, O.; NOVAES, R. M. L. **RenovaCalcMD**: método e ferramenta para a contabilidade da intensidade de carbono de biocombustíveis no programa RenovaBio, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/amp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-e-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cpio-2018_nota-tecnica-renova-calc.pdf. Acesso em: 31 mar. 2022.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; SCACHETTI, M.T.; CHAGAS, M.F.; SEABRA, J.E.A.; MOREIRA, M.M.R.; BONOMI, A.M.; BAYMA, G.; PICOLI, J.F.; MORANDI, M.A.B.; RAMOS, N.P.; CAVALETT, O.; NOVAES, R.M. **RenovaCalcMD**: método e ferramenta para a contabilidade da intensidade de carbono de biocombustíveis no programa RenovaBio, 2018. 58 p. Disponível em: <https://www.gov.br/amp/pt-br>. Acesso em: 31 mar. 2022.

FOLEGATTI-MATSUURAA, M. I. S.; SILVA, O. R. R. F.; NOVAES, R. M. L.; PICOLI, J. F. Life cycle assessment of sisal produced in semiarid regions in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NATURAL FIBERS, 4., 2019, Porto. **Smart sustainable solutions: book of abstracts**. Minho, Portugal: University of Minho, 2019. p. 416-417.

GAROFALO, D. F. T.; NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A.; MACIEL, V. G.; BRANDÃO, M.; SHIMBO, J. Z.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. da S. F. Land-use change CO₂ emissions associated with agricultural products at municipal level in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, article 132549, 2022.

GAVRILOVA, O.; LEIP, A.; DONG, H.; MACDONALD, J. D.; GOMEZ BRAVO, C. A.; AMON, B.; BARAHONA ROSALES, R.; PRADO, A. del; LIMA, M. A. de; OYHANTÇABAL, W.; WEERDEN, T. J. van der; WIDIAWATI, Y. Emissions from livestock and manure management. In: CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROSHENKO, Y. SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (ed.). **Refinement to the 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories. Agriculture, forestry and other land use**. Geneve: IPCC, 2019. v. 4. cap. 10. p. 10.9-10.167.

GENTIL, C.; FANTKE, P.; MOTTES, C.; BASSET-MENS, C. Challenges and ways forward in pesticide emission and toxicity characterization modeling for tropical conditions. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 7, p. 1290-1306, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01865-6>.

HIRAKURI, M. H.; DEBIASI, H.; PROCÓPIO, S. de O.; FRANCHINI, J. C.; CASTRO, C. de. **Sistemas de produção: conceitos e definições no contexto agrícola**. Londrina: Embrapa Soja, 2012. 24 p. (Documentos/Embrapa Soja, n. 335).

JOINT RESEARCH CENTRE. Institute for Environment and Sustainability. **International reference life cycle data system (ILCD) handbook: general guide for life cycle assessment: detailed guidance**. Publications Office, 2010, Disponível em: <s://data.europa.eu/doi/10.2788/38479>. Acesso em: 10 jan. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040 environmental management of life cycle assessment: principles and framework**. Geneva. 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044 environmental management of life cycle assessment: requirements and guidelines**. Geneva. 2006b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14067:2018 greenhouse gases - carbon footprint of products — requirements and guidelines for quantification**. 2018. 46 p. Disponível em: www.iso.org/standard/71206.html. Acesso em: 02 fev. 2022.

KOCH, P.; SALOU, T. **AGRIBALYSE®: rapport méthodologique -volet agriculture**. Version 3.0; version initiale v1.0;2014. Angers, France: Ed ADEME, 2020. 319 p.

LAM, W. Y.; CHATTERTON, J.; SIM, S.; KULAK, M.; BELTRAN, A. M.; HUIJBREGTS, M. A. J. Estimating greenhouse gas emissions from direct land use change due to crop production in multiple countries. **Science Total Environment**, Article 143338, Part 2, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143338>.

MACIEL, V. G.; ZORTEA, R. B.; DA SILVA, W. M.; CYBIS, L. F. D.; EINLOFT, S.; SEFERIN, M. Life Cycle Inventory for the agricultural stages of soybean production in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 65-74, 2015.

MAHMOOD, I.; IMADI, S. R.; SHAZADI, K.; GUL, A.; HAKEEM, K. R. Effects of pesticides on environment. In: Hakeem K., Akhtar M., and Abdullah S. (ed.). **Plant, soil and microbes**. Springer, Cham., 2016. p. 253-269. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3_13.

MARKERT, N.; RHIEM, S.; TRIMBORN, M.; GUHL, B. Mixture toxicity in the Erft River: assessment of ecological risks and toxicity drivers. **Environmental Sciences Europe**, v. 32, n. 51, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00326-5>.

MELERO, C.; GENTIL, C.; PEÑA, N.; RENAUD-GENTIÉ, C.; FANTKE, P. **Documentation of air, soil, and water emission modelling in PestLCI Consensus model. OLCA-Pest deliverable 3.3., 2020**. Disponível em: https://www.sustainability.man.dtu.dk/english/-/media/centre/qa/olca623pest/deliverables/olca-pest_d3-3_public.pdf. Acesso em: 31 mar. 2022.

MORITA, A. M.; MOORE, C. C. S.; NOGUEIRA, A. R.; KULAY, L.; RAVAGNANI, M. A. S. Assessment of potential alternatives for improving environmental trouser jeans manufacturing performance in Brazil, **Journal of Cleaner Production**, 119156, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119156>.

MOREIRA, M.; NOVAES, R. M. L.; SCACHETTI, M. T.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; MATSUURA, M. I. S. F.; RAMOS, N. P.; MORANDI, M. A. B.; BONOMI, A. Proposta de contabilização da mudança de uso da terra na política nacional de biocombustíveis (RenovaBio). In: Embrapa Meio Ambiente-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 6., 2018, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: Ibict, 2018.

MÜLLER-CARNEIRO, J.; DIAS, A. F.; BARROS, V. D. S.; GIONGO, V.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; BRITO DE FIGUEIRÊDO, M. C. Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the semiarid region. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 4, p. 735-752, 2019.

NASCIMENTO, G. C. do; SHIOSAWA, M. L.; SAVIOLI, J. P. P. D.; DOS SANTOS, A. B. G. F.; RODRIGUES, T. O.; PICOLI, J. F.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; UGAYA, C. M. L.; FOLEGATTI, M. I. S. **Manual de validação de inventários convertidos de ecospold2 para ILCD**. Jaguariúna: [S.l.p.], 2020. Disponível em: https://utfpr-ct-static-content.s3.amazonaws.com/gyro.ct.utfpr.edu.br/wp-content/uploads/2020/08/2-Manual-validac%C3%A7%C3%A3o-datasets-ecospold-ILCD_final.pdf. Acesso em: 31 mar. 2022.

NEMECEK, T.; BENGOA, X.; LANSCH, J.; MOURON, P.; RIEDENER, E.; ROSSI, V.; HUMBERT, S. Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products, version 3.0. **World Food LCA Database (WFLDB)**. Lausanne and Zurich, Switzerland: Quantis and Agroscope, 2015.

NEMECEK, T.; BENGOA, X.; LANSCH, J.; ROESCH, A.; FAIST-EMMENEGGER, M.; ROSSI, V.; HUMBERT, S. Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products, version 3.5. **World Food LCA Database (WFLDB)**, Lausanne and Zurich, Switzerland: Quantis and Agroscope, 2019.

NEMECEK, T.; FRICK, C.; DUBOIS, D.; GAILLARD, G. Comparing farming systems at crop rotation level by LCA. In: GEERKEN, T.; MATTSON, B.; OLSSON, P.; JOHANSSON, E. (ed.), **Proceedings of the International Conference on LCA in Foods**, Gothenburg. SIK, VITO, 2001. p. 65-69.

NEMECEK, T.; KÄGI, T. Life cycle inventories of agricultural production systems. **Ecoinvent Report**, n. 15. Zürich and Dübendorf: ART, 2007. 46 p.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. **Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems**. Zurich, Data v3.0, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Freddy_Navarro-Pineda/post/How_to_easily_predict_the_leaching_of_heavy_metals_from_soils/attachment/59d61f9d79197b807797e0dc/AS%3A285638185242630%401445112858480/download/ART+2012+-+Methods+of+assessment+of+direct+field+emissions+for+agricultural+systems.pdf

NOVAES, R. M. L.; TUBIELLO, F. N.; GAROFALO, D. F. T.; SANTIS, G.; PAZIANOTTO, R. A. AL.; MATSUURA, M. I. S. F. **Brazil's agricultural land, cropping frequency and second crop area: FAOSTAT statistics and new estimates**. Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2022. 26 p.

NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A.; BRANDÃO, M.; ALVES, B. J. R.; MAY, A.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S. Estimating 20-year land-use change and derived CO₂ emissions associated with crops, pasture and forestry in Brazil and each of its 27 states. **Global Change Biology**, v. 23, p. 3716-3728, 2017.

PERIN, A.; SANTOS, R.H.S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J.G.M.; CECON, P.R. et al. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 35-40, 2004.

PICOLI, J. F.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; RAMOS, N. P.; CHAGAS, M. F.; CAVALETT, O.; SILVA, M. S. G. da Desempenho ambiental de cana de açúcar: sistema de produção convencional versus conservacionista. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LATINOAMÉRICA, CILCA, 7., 2017, Medellín, Colômbia. [Anais ...]. Medellín: Universidad EAFIT, 2017. p. 156-158.

PICOLI, J. F.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; SEABRA, J. E. A.; BUNGENSTAB, D. J. Environmental profile of the integrated production of ethanol and beef cattle in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ANALYSIS, 8., 2019, Cartago. **LCA for global competitiveness: proceedings**. Cartago: Red Iberoamericana de Ciclo de Vida, 2020. p. 233-237.

POORE, J.; NEMECEK, T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. **Science**, v. 360, n. 6392, p. 987-992, 2018.

RAMOS, N. P.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; SOARES, D. J.; MACIEL, V. G.; MICHELOTTO, M. D.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S. Desempenho ambiental do amendoim produzido em sistema de rotação

com pastagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 7., 2021. **Anais...** [volume II]: UFRGS, 2021. Evento online. p. 57-61.

RODRIGUES, T. O.; SUGAWARA, E. T.; SILVA, D. A. L.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; BRAGA, T. E. N.; UGAYA, C. M. L. **Guia Qualidata**: requisitos de qualidade de conjuntos de dados para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida. Brasília: Ibict, 2016. Disponível em: <https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2017/05/Qualidata.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2022.

SAMPAIO, A. P. C.; SILVA, A. K. P.; AMORIM, J. R. de; SANTIAGO, A. D.; MIRANDA, F. R. de; BARROS, V. S.; SALES, M. C. L.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. de. Reducing the carbon and water footprints of Brazilian green coconut. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 4, p. 707-723, 2021.

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para metas climáticas do Brasil – 1970 – 2020**. 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em: 31 mar. 2022.

SILVA, C. B.; VALENTE, L. M.; MATOS, E.; BRANDÃO, M.; NETO, B. Life cycle assessment of aquafeed ingredients. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 5, p. 995-1017, 2018.

TANG, F. H. M.; LENZEN, M.; MCBRATNEY, A.; MAGGI, F. Risk of pesticide pollution at the global scale. **Nature Geoscience**, v. 14, p. 206-210, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5>.

TUBIELLO, F. N.; ROSENZWEIG, C.; CONCHEDDA, G.; KARL, K.; GÜTSCHOW, J.; XUEYAO, P.; OBLI-LARYEA, G.; WANNER, N.; QIU, S. Y.; BARROS, J.; FLAMMINI, A.; MENCOS-CONTRERAS, E.; SOUZA, L.; QUADRELLI, R.; HEIÐARSDÓTTIR, H. H.; BENOIT, P.; HAYEK, M.; SANDALOW, D. Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 6, 065007, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e>.

UHL, P.; BRÜHL, C. A. The Impact of Pesticides on Flower-Visiting Insects: A Review with Regard to European Risk Assessment. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 38, n. 11, p. 2355-70, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.4572>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME. **Life cycle assessment: what it is and how to do it**. Paris: UNEP, 1996. 91 p.

VAN MIDDELAAR, C. E.; CEDERBERG, C.; VELLINGA, T. V.; VAN DER WERF, H. M.; DE BOER, I. J. Exploring variability in methods and data sensitivity in carbon footprints of feed ingredients. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 4, p. 768-782, 2013.

VAN PAASSEN, M.; BRACONI, N.; KULING, L.; DURLINGER, B.; GUAL, P. **Agri-footprint 5.0**: part 2: description of data. The Netherlands: Gouda, 2019. Disponível em: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/Agri-Footprint-5.0-Part-2-Description-of-data.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2022.

WAGNER, S. A.; GIASSON, E.; MIGUEL, L. M.; MACHADO, J. A. D. (Org.). **Gestão e Planejamento de Unidades de Produção Agrícolas**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2010. (Série Educação a Distância). Disponível em: <http://www6.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derador15.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2022.