

Rio de Janeiro, RJ / Outubro, 2025

Indicadores de sustentabilidade e índices compostos

Uma revisão no contexto do projeto Módulo IS_Agro

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL



Embrapa

Solos

***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura e Pecuária***

ISSN 1517-2627 / e-ISSN 2966-2443

Documentos 248

Outubro, 2025

Indicadores de sustentabilidade e índices compostos

Uma revisão no contexto do projeto Módulo IS_Agro

*Eliane Gonçalves Gomes
Pedro Luiz de Freitas
Rodrigo Peçanha Demonte Ferraz
Margareth Gonçalves Simões*

***Embrapa Solos
Rio de Janeiro, RJ
2025***

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024.
Jardim Botânico.
Rio de Janeiro, RJ
22460-000
www.embrapa.br/solos
www.embrapa.br/fale-conosco

Comitê Local de Publicações

Presidente

Cláudia Pozzi Jantalia

Secretário-executivo

Marcos Antônio Nakayama

Membros

*Bernadete da Conceição Carvalho
Gomes Pedreira, David Vilas Boas
de Campos, Evaldo de Paiva Lima,
Helga Restum Hissa, José Francisco
Lumbreras, Joyce Maria Guimarães
Monteiro, Lucia Raquel Queiroz Pereira
da Luz, Maurício Rizzato Coelho e
Wenceslau Geraldes Teixeira*

Edição executiva

Marcos Antônio Nakayamal

Revisão de texto

Marcos Antônio Nakayama

Normalização bibliográfica

Enyomara Lourenço Silva

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Alexandre Abrantes Cotta de Mello

Foto da capa

Luiz Henrique Magnante

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Solos

Indicadores de sustentabilidade e índices compostos: uma revisão no contexto do projeto Módulo IS_Agro / Eliane Gonçalves Gomes ... [et al.]. – Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2025.

PDF (100 p.) : il. color. – (Documentos / Embrapa Solos, eISSN 2966-2443 ; 248).

1. Agricultura. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Indicadores Sócio Agroambientais. 4. Sustentabilidade. 5. Inteligência estratégica. 6. Meio ambiente. I. Gomes, Eliane Gonçalves. II. Freitas, Pedro Luiz de. III. Ferraz, Rodrigo Peçanha Demonte. IV. Simões, Margareth Gonçalves. V. Embrapa Solos. VI. Série.

CDD (21. ed.) 632.950981

Enyomara Lourenço Silva (CRB-4/1569)

© 2025 Embrapa

Autores

Eliane Gonçalves Gomes

Engenheira química, doutora em Engenharia de Produção,
Pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro RJ

Pedro Luiz de Freitas

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, Pesquisador da
Embrapa Solos, Rio de Janeiro RJ

Rodrigo Peçanha Demonte Ferraz

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Meio Ambiente,
Pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro RJ

Margareth Simões

Engenheira, doutora em Geografia, Pesquisadora da Embrapa Solos
e professora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de
Janeiro RJ

Os autores agradecem o apoio financeiro do projeto “Módulo IS_Agro – Indicadores Agro-Socioambientais do Brasil: Inteligência Estratégica para a Sustentabilidade da Agropecuária Nacional”, proposto pelo Ministério da Agricultura e Pecuária e executado pela Embrapa por meio do TED MAPA/SDI nº 450/2021 - 23/12/2021, Doc. SEI 6451607.

Apresentação

Este documento aborda um tema de crescente relevância para a agropecuária brasileira, a definição e a análise de indicadores de sustentabilidade e de índices compostos. No cenário global atual de crescente demanda por alimentos, de recursos naturais finitos e de necessidade de mitigação dos impactos das mudanças climáticas, a sustentabilidade é um requisito para a competitividade e para a continuidade da agropecuária nacional.

A relevância da agropecuária brasileira, seja em termos de potencial produtivo ou de seu papel na segurança alimentar e na economia, traz, em contrapartida, a responsabilidade de garantir que o crescimento e a produtividade sejam alcançados de forma ambientalmente responsável, socialmente justa e economicamente viável.

A definição do conceito de sustentabilidade, bem como formas de sua mensuração, tem recebido atenção crescente das discussões em fóruns de decisão nacionais e internacionais, bem como da literatura técnico-científica. Propor métricas e indicadores aderentes ao conceito de sustentabilidade definido é um dos desafios que se apresentam, em especial no que se refere ao setor agropecuário. Nesse contexto, a definição e o monitoramento de indicadores de sustentabilidade surgem como ferramentas indispensáveis, pois possibilitam:

- Quantificar e qualificar o desempenho da agropecuária em relação aos seus impactos ambientais (como emissões de gases de efeito estufa, uso da água, conservação do solo e da biodiversidade), sociais (como condições de trabalho e segurança alimentar) e econômicos (como rentabilidade, eficiência no uso de recursos e geração de valor).
- Estabelecer metas e acompanhar o progresso em direção a sistemas de produção mais sustentáveis.
- Comunicar o desempenho da agropecuária brasileira para a sociedade, consumidores e mercados internacionais, de forma

clara, transparente e confiável, o que fortalece a imagem do setor e facilita o acesso a mercados mais exigentes em termos de sustentabilidade.

- Orientar a formulação de políticas públicas e a tomada de decisões, com incentivo a práticas mais sustentáveis.

Neste documento, apresenta-se uma contribuição ao tema a partir de uma revisão sobre indicadores e índices globais de sustentabilidade e específicos para o setor agropecuário. São abordados aspectos teóricos sobre a construção de índices compostos. Sugerem-se, ainda, etapas potenciais para as propostas de modelos conceituais de índices de sustentabilidade no contexto do projeto Módulo IS_Agro, uma iniciativa que visa desenvolver um sistema de indicadores agro-socioambientais para fortalecer a sustentabilidade da agropecuária nacional.

Marisa Teixeira Mattioli

Chefe-Geral em exercício da Embrapa Solos

Sumário

Introdução	11
Indicadores e índices de sustentabilidade	15
Indicadores e índices de sustentabilidade gerais	16
Indicadores e índices de sustentabilidade empresarial	20
Indicadores e índices de sustentabilidade na agropecuária	23
Algumas iniciativas na Embrapa	27
Índices compostos	36
Definição de indicadores	36
Aspectos gerais sobre índices compostos	38
Normalização de dados	42
Métodos de ponderação e de agregação	43
Modelo Conceitual para estimativa de um índice de sustentabilidade – proposta do projeto Módulo IS_Agro	58
Dimensão agroambiental	59
Dimensão socioeconômica	62
Índice composto de sustentabilidade agro-socioambiental (ISAgro)	63
Índice de sustentabilidade empresarial do agronegócio (ISEAgro)	65
Considerações finais	66
Referências	67

Introdução

O desafio do desenvolvimento sustentável não é novo. Em 1987, a Comissão Mundial de Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas publicou o relatório *Nosso Futuro Comum* (*Our Common Future*), também conhecido como *Brundtland Report*, estabelecendo os princípios e a definição de desenvolvimento sustentável (United Nations, 1987): “é o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades”. Desde então, ocorreram cerca de quatro décadas de debates multilaterais, com destaque para: (i) Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em 1972; (ii) Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1992, e o lançamento da Agenda 21, uma espécie de carta de intenções para promover um novo padrão de desenvolvimento em escala global; (iii) Cúpula do Milênio das Nações Unidas, em 2000, e a proposição de oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio; (iv) Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, em 2015, com o lançamento da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), plano de ação para que países trabalhem em parceria no atendimento de questões socioambientais até 2030. Os ODS operacionalizam a Agenda 2030 por meio de seus objetivos e metas de ação global (IBGE, 2023b) e orientam ações nas três dimensões do desenvolvimento sustentável: econômica, social e ambiental.

Ao apresentar desafios e necessidades da sociedade, que podem ser convertidos em oportunidades de negócios, a temática da sustentabilidade torna-se uma questão financeira e afeta também empresas e produtores rurais. Um exemplo é o conceito ESG – Ambiental, Social e Governança (*Environmental, Social and Governance*), o qual passou a compor o vocabulário do setor agropecuário nacional (Embrapa, 2022) e designa práticas ambientais, sociais e de gestão, empresariais ou de negócios. O termo apareceu pela primeira vez em

2004, na incitativa *Quem Cuida Ganha* (*Who Cares Wins*), conforme United Nations (2004) e Knoepfel e Hagart (2009). O conceito ESG norteia hoje diversos índices de sustentabilidade empresariais, em especial para empresas com ações negociadas em bolsas de valores de diversos países. Um estudo sobre a evolução do conceito ESG no Brasil pode ser visto em Pacto Global - Stilingue (United Nations, 2021).

No que se refere à produção agropecuária, o aumento da produtividade do setor e de sua sustentabilidade tem sido um dos focos das discussões dos países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) e de países convidados (European Union, 2022b). A medição e o acompanhamento da evolução da produtividade total dos fatores (PTF) é uma área de interesse político de longa data desse organismo, visto que a PTF é um importante indicador de desempenho do setor. Recentemente, a Rede da OECD sobre Produtividade Total dos Fatores Agrícola e o Meio Ambiente tem discutido como incorporar subprodutos ambientais às medidas tradicionais da PTF (Bureau; Antón, 2022; European Union, 2022b).

Fomentar soluções para a agropecuária brasileira com base nas premissas da sustentabilidade, a partir do comprometimento com padrões de qualidade, significa oportunizar investimentos e atrair consumidores. O novo paradigma da produção agropecuária é o de aumento da produção com menor consumo de recursos e com menor geração de resíduos poluentes. Tecnologias da agricultura 4.0 (agricultura de precisão e digital), em conjunto com práticas de manejo mais sustentáveis (agricultura e pecuária de baixo carbono, sistemas integrados, plantio direto, bioinsumos etc.), e boas práticas de gestão podem ser base da desejada “produção com preservação”.

Alguns desses desafios são discutidos por Søndergaard et al. (2023) no contexto da agricultura brasileira, com enfoque em aspectos de política internacional e no papel do Brasil na agenda ambiental e finança verde, desafios de inovação e tecnológicos, além daqueles relacionados à inclusão social e produtiva, considerando o contexto ESG e de bioeconomia.

O projeto “Módulo IS_Agro – Indicadores Agro-socioambientais do Brasil: Inteligência Estratégica para a Sustentabilidade da Agropecuária Nacional”¹ enquadra-se nesse cenário e objetiva ser uma fonte de informações, indicadores e índices agroambientais para suporte às iniciativas de monitoramento da sustentabilidade da agricultura brasileira. O projeto foi proposto e financiado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa)² e é executado pela Embrapa, por meio das Unidades Descentralizadas Embrapa Solos, Embrapa Agrobiologia, Embrapa Meio Ambiente e Embrapa ARIN, em colaboração com o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) e outras instituições parceiras. Prevê-se, no projeto, a estimativa de indicadores agro-socioambientais, disponibilizados em ambiente digital (módulo integrado à Plataforma Pronasolos³), fundamentados naqueles propostos e recomendados pela OECD (European Union, 2022a), e a proposição de modelos conceituais sobre indicadores de caráter socioeconômico e um índice de sustentabilidade empresarial do agronegócio (ISEAgro). Neste sentido, ao incorporar diferentes dimensões e indicadores de sustentabilidade, o projeto Módulo IS_Agro pretende ser uma medida objetiva do uso racional de recursos naturais e de insumos agropecuários para a produção agropecuária no Brasil. Poderá, portanto, servir de subsídio às instâncias de decisão e aos processos de planejamento e de gestão do setor agropecuário.

Dado este cenário, neste documento são brevemente apresentados alguns indicadores e índices globais de sustentabilidade e outros específicos para o setor agropecuário descritos na literatura. São abordados também aspectos teóricos sobre índices compostos e potenciais etapas para as propostas de modelos conceituais dos índices

(1) Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1154982/1/Indicadores-agro-socioambientais-do-Brasil-2023.pdf>.

(2) Projeto executado através do Termo de Execução Descentralizada (TED nº 450/2021, 23/12/2021, Doc. SE¹ 6451607).

(3) Disponível em: <https://pronasolos.sgb.gov.br/dashboards/>.

de sustentabilidade agro-socioambiental (ISAgro) e empresarial do agronegócio (ISEAgro), inseridos no projeto Módulo IS_Agro.

Com esse documento, objetiva-se: (a) apresentar uma visão geral de indicadores e índices de sustentabilidade existentes, tanto em nível global quanto para o setor agropecuário; (b) discutir aspectos teóricos relacionados à construção de índices compostos; (c) explorar potenciais etapas para o desenvolvimento de modelos conceituais para a dimensão socioeconômica do Índice de Sustentabilidade Empresarial do Agronegócio (ISEAgro).

Segundo a definição de Siche et al. (2007), índices são instrumentos de tomada de decisão e são a agregação de um conjunto de indicadores, critérios ou variáveis. Segundo os mesmos autores, indicadores são parâmetros que mensuram e avaliam um aspecto ou as condições da unidade de observação em apreço. São usualmente definidos pela combinação de mais de uma variável ou métrica.

Este trabalho atende, de modo transversal, aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estipulados pelas Nações Unidas (ONU). Particularmente, atende ao ODS 2 — Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável mais especificamente à meta 2.4, que pretende até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo. Atende, ainda, ao ODS 15 — Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade, mais especificamente à meta 15.3, que pretende até 2030, combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo.

Indicadores e índices de sustentabilidade

Elkington (1998) popularizou os três pilares da sustentabilidade (*triple bottom line*): social, ambiental e econômico. Sustentabilidade é, portanto, um conceito multidimensional. Para medir quantitativamente a sustentabilidade, é necessário definir indicadores que representem os diversos aspectos do que se pretende avaliar. Do ponto de vista organizacional, os preceitos ESG (ambiental, social e governança) guiam atualmente as decisões no contexto da sustentabilidade.

O grande número de indicadores sociais, ambientais, econômicos e de governança existentes sugere um cenário complexo do que se entende por sustentabilidade. Para que sejam úteis na tomada de decisão, esses indicadores (ou critérios) podem ser apresentados como uma estrutura conceitual ou agregados em índices compostos. Para a OECD (European Union, 1999a), a seleção de indicadores de sustentabilidade deve considerar a relevância para a formulação de políticas, a validade ou a solidez analítica, a acessibilidade aos usuários em uma escala apropriada, a mensurabilidade/disponibilidade/facilidade de aquisição de dados. Pode ser ainda considerada a constância ou continuidade das séries históricas das variáveis componentes dos indicadores.

Apesar das discussões sobre sustentabilidade e da popularidade de indicadores e índices relacionados, Mayer (2008) alerta que sustentabilidade ainda é um cenário a ser alcançado. Para o autor, há falhas no uso de índices de sustentabilidade que vão além de questões metodológicas; devem-se à falta de consenso sobre o que seja quantitativamente sustentabilidade, à insuficiência de dados para o correto cálculo de indicadores e índices, e ao não seguimento pelos tomadores de decisão dos “conselhos” dados pelos índices. A potencial desconexão entre a teoria sobre desenvolvimento sustentável e o uso prático de indicadores e índices é discutida em Chesson (2013), tendo em vista as diferentes escalas de atuação (global e nacional na

teoria; regional, local e individual na prática). Acrescente-se que as estruturas metodológicas de indicadores de sustentabilidade tendem a ser mais descritivas do que analíticas. Segundo Whitehead (2017), esta característica limita a habilidade de definir quais fatores devem ser medidos e como responder a esses fatores, o que implicaria priorizar aqueles mais relevantes.

Indicadores e índices de sustentabilidade gerais

As primeiras iniciativas para avaliar sustentabilidade datam da década de 1970, com a implementação de um sistema de dados ambientais (Rapport; Friend, 1979). Desde então, diversas ferramentas e metodologias foram publicadas para avaliação de sustentabilidade, com focos e escalas distintos. Dizdaroglu (2017) traz uma compilação de cerca de 50 iniciativas para medir sustentabilidade, que consideram a escala local, regional, nacional ou internacional. Dentre as iniciativas internacionais, podem ser destacadas:

- Relatório de Desenvolvimento Sustentável Global das Nações Unidas (United Nations, 2023): toma por base a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Considera indicadores de pobreza, governança, saúde, riscos naturais, atmosfera, terra, oceanos, mares e costas, água doce, biodiversidade, desenvolvimento econômico, parceria econômica global, padrões de consumo e produção.
- Relatório de Desenvolvimento Humano, do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (United Nations [...], 2022, 2023a): indicadores que constituem o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e que englobam as categorias saúde, educação, renda e recursos financeiros, desigualdade, gênero, pobreza, trabalho, emprego e vulnerabilidade, segurança

humana, comércio e fluxos financeiros, mobilidade e comunicação, sustentabilidade ambiental, demografia.

- Indicadores de Desenvolvimento (*World Development Indicators* – WDI) do Banco Mundial (World Bank Group, 2023): temáticas agricultura e desenvolvimento rural, mudanças climáticas, economia e crescimento, educação, energia e mineração, meio ambiente, dívida externa, setor financeiro, gênero, saúde, infraestrutura, pobreza, setor privado, setor público, ciência e tecnologia, desenvolvimento social, proteção social e trabalho, comércio, desenvolvimento urbano.
- Indicadores da OECD para Crescimento Verde e Desenvolvimento Sustentável (European Union, 2023a) e outros Indicadores Gerais da OECD (European Union, 2022a, 2023b): indicadores calculados pela OECD para os países membros e outros em temáticas selecionadas, como agricultura e pesca, demografia e população, economia e finanças, educação, meio ambiente, saúde, indústria e serviços, trabalho, contas nacionais, ciência, tecnologia e patentes, proteção social e bem-estar, transportes. Os indicadores da temática “agricultura e pesca” são agrupados em perspectivas agrícolas (*outlook*), indicadores de política agrícola e indicadores ambientais para a agricultura. Estes são ainda categorizados como indicadores agroambientais – nutrientes e outros indicadores agroambientais.
- Análise da Sustentabilidade de Sistemas Agroalimentares (*Sustainability Assessment of Food and Agriculture systems* – SAFA) da FAO (FAO, 2014): ferramenta de avaliação de sustentabilidade para cadeias de valor agroalimentares, que objetiva estabelecer uma referência internacional para avaliar compromissos e sinergias entre as dimensões da sustentabilidade, seja para produtores ou empresas envolvidos com produção, processamento, distribuição e comercialização de bens das cadeias agroalimentares. Os 118 indicadores componentes da ferramenta SAFA compreendem as dimensões governança, integridade ambiental, resiliência econômica e bem-estar social.

Para o contexto nacional, podem ser citadas, de modo abrangente, as seguintes iniciativas de formulação e mensuração de indicadores de sustentabilidade:

- Atlas do Desenvolvimento Humano e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – IDHM (United Nations Development Programme, 2013, 2020, 2023b) – PNUD Brasil, 2013, 2020, 2023; PNUD IPEA FJP, 2013, 2020: o IDHM segue as dimensões do IDH Global, com metodologia adaptada ao contexto brasileiro e à disponibilidade de indicadores nacionais. O IDHM é resultado da média geométrica de três dimensões: educação (medida pela escolaridade da população adulta e fluxo escolar da população jovem), longevidade (expectativa de vida ao nascer) e renda (renda mensal *per capita*). Já o Atlas é composto por cerca de 120 indicadores municipais, agrupados nas temáticas população, saúde, educação, renda, habitação, vulnerabilidade, meio ambiente, participação política, e que servem de suporte à análise das dimensões do IDHM.
- Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal – IFDM (Firjan, 2018a, 2018b): objetiva acompanhar anualmente o desenvolvimento socioeconômico dos municípios brasileiros nas dimensões emprego e renda, educação e saúde (com igual ponderação), com base em estatísticas públicas oficiais, disponibilizadas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (geração de emprego formal, taxa de formalização do mercado de trabalho, geração de renda, massa salarial real no mercado de trabalho formal, índice de Gini de desigualdade de renda no trabalho formal), Ministério da Educação (atendimento à educação infantil, abandono no ensino fundamental, distorção idade-série no ensino fundamental, docentes com ensino superior no ensino fundamental, média de horas-aula diárias no ensino fundamental, resultado do Ideb no ensino fundamental) e Ministério da Saúde (proporção de atendimento adequado de pré-natal, óbitos por causas mal definidas, óbitos infantis por causas evitáveis, interação sensível à atenção básica).

- Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Ferreira, 2023; IBGE, 2023b): indicadores produzidos pelo IBGE e por 22 instituições colaboradoras, que contemplam os 17 ODS estabelecidos pela ONU. Totalizam atualmente 254 indicadores (121 produzidos, 72 em construção, 51 sem dados, 10 não se aplicam ao Brasil).
- Indicadores de Desenvolvimento Sustentável – IDS (IBGE, 2017): com o objetivo de acompanhar a sustentabilidade do padrão de desenvolvimento do país, os IDS contemplam os temas: ambiental (preservação e conservação do meio ambiente; 19 subtemas, 59 indicadores); social (satisfação das necessidades humanas, a melhoria da qualidade de vida e a justiça social; 23 subtemas, 35 indicadores); econômico (uso e esgotamento dos recursos naturais, produção e gerenciamento de resíduos, uso de energia, e desempenho macroeconômico e financeiro do país; 12 subtemas, 22 indicadores); e institucional (orientação política, capacidade e esforço de governos e sociedade na implementação das mudanças que levam ao desenvolvimento sustentável; 11 subtemas, 16 indicadores).
- Indicadores Não Monetários de Pobreza e Qualidade de Vida no Brasil (IBGE. Diretoria de Pesquisas, 2023a): indicadores derivados da Pesquisa de Orçamentos Familiares do IBGE, que retratam a pobreza e a vulnerabilidade no Brasil a partir de uma abordagem multidimensional e não monetária, integrada à avaliação da qualidade de vida. Os três índices (índice de pobreza multidimensional não monetário, índice de vulnerabilidade multidimensional não monetário, índice de pobreza multidimensional com componente relativo) contemplam as dimensões moradia, serviços de utilidade pública, educação, alimentação e saúde, acesso aos serviços financeiros e padrão de vida, transporte e lazer, em um total de 51 variáveis binárias.

Indicadores e índices de sustentabilidade empresarial

Com a crescente atenção de países e pessoas à temática da sustentabilidade ambiental e social, além da econômica, as discussões sobre como medir e avaliar sustentabilidade também alcançaram as empresas, em especial aquelas listadas em mercados de capitais. O desempenho corporativo, que antes era medido apenas por critérios econômico-financeiros, passa a ter caráter multidimensional e incorporar critérios referentes à responsabilidade social e ambiental e à satisfação do cliente e dos empregados (Medne; Lapina, 2019).

A partir do final da década de 1990, foram propostos indicadores para avaliar o desempenho das empresas em termos de sustentabilidade e para destacar aquelas comprometidas com a responsabilidade social e ambiental. Esses indicadores são, em geral, agregados em índices compostos que refletem a sustentabilidade empresarial ou corporativa. O primeiro índice de sustentabilidade empresarial (ISE) foi criado em 1999: o Índice *Social Domini* 400, após a apresentação pela Bolsa de Valores de Nova York do Índice *Dow Jones* de Sustentabilidade – *Dow Jones Sustainability Index*, *benchmark* mundial. Na sequência, foram lançados os índices *FT-SE4good*, em 2001, em Londres; o Índice Socialmente Responsável, em 2004, em Joanesburgo; Índice de Sustentabilidade Empresarial, em 2005, da Bolsa de Mercadorias e Futuros e de Valores de São Paulo (ISE B3). Entre outros índices de sustentabilidade empresarial, podem ser citados os administrados pela *Vigeo Eiris* e *Sustainalytics*, *Ethibel Sustainability Indices*, *MSCI ESG Indexes*, *Bloomberg Gender Equality Index*, *Calvert Social Index*, *KLD Indices* (Orsato et al., 2015; Rahdari; Rostamy, 2015; Diez-Cañamero et al., 2020). Parte dessas iniciativas baseia-se nas premissas ESG. Em Lozano (2020), é apresentada uma revisão de 24 ferramentas, iniciativas e abordagens referentes à sustentabilidade corporativa e é proposta uma combinação de algumas delas.

Segundo Orsato et al. (2015), as motivações de empresas a participarem voluntariamente de iniciativas como os ISE vão além dos

incentivos financeiros. Segundo esses autores, vários estudos identificaram como motivações não financeiras: disponibilidade de recursos e capacidades, institucionalização, acesso ao conhecimento, inovação e vantagem competitiva, ganho de reputação.

Apesar do progresso na proposição dos ISE e embora busquem quantificar e qualificar o mesmo objeto, cada ferramenta é construída por critérios diferentes, o que causa alguns problemas (Diez-Cañamero et al., 2020). Destacam-se: resultados divergentes de uma mesma empresa em diferentes ISE de que participa; metodologias usadas podem atender a interesses particulares e não seguir uma lógica de objetividade e imparcialidade; critérios econômico-financeiros podem prevalecer em detrimento dos critérios ESG na composição do ISE, dada a natureza do mercado.

Em Orsato et al. (2015); Rahdari e Rostamy (2015); Andreu Pinillos et al. (2018); Medne e Lapina (2019); Diez-Cañamero et al. (2020); Lozano (2020), entre outros, pode ser encontrada uma revisão sobre os ISE existentes, com discussões sobre suas características particulares, além de revisão sobre indicadores componentes de ISE. Em Callado (2010), além de revisão da literatura sobre ISE, há proposta de modelo de mensuração de sustentabilidade empresarial que considera as dimensões econômica, social e ambiental e que foi aplicado a vinícolas da Serra Gaúcha

Índice de sustentabilidade empresarial da B3 (ISE B3)

Quarto índice de sustentabilidade empresarial a surgir no mundo, o ISE B3 foi criado em 2005 e sua evolução segue o amadurecimento do tema da sustentabilidade empresarial, no sentido de que as empresas devem gerar valor além do econômico-financeiro corporativo, incorporando o tripé ESG (Zacharias et al., 2023). O ISE B3, além de apoiar investidores em decisões sobre investimentos socialmente responsáveis, busca induzir a adoção de práticas de sustentabilidade empresarial pelas empresas participantes.

O ISE B3 busca avaliar quanto uma empresa está contribuindo materialmente em impactos financeiro e não financeiro no cenário

atual de transição para um novo paradigma de produção e consumo. Isso implica medir a contribuição da empresa tanto em termos do impacto (extensão em que a empresa influencia e é influenciada por fatores de sustentabilidade), quanto financeiros (implicações financeiras decorrentes da participação nesse novo cenário).

Sobre a adesão (voluntária) das empresas a este ISE, Orsato et al. (2015) relatam que as empresas participantes desejam mostrar ao mercado não apenas um esforço para valorar desempenho social e ambiental, mas coerência no alinhamento entre sustentabilidade e estratégia corporativa. Mencarini e Amato Neto (2008) explicam que, além de uma questão de quebra de paradigmas e de sobrevivência organizacional, aderir ao ISE evidencia o comprometimento da organização com aspectos relacionados à sustentabilidade. Lara (2020), ao discutir as características que motivam a participação das empresas no ISE B3, verificou que empresas maiores, mais rentáveis, de maior endividamento e de setores de atividade com maior potencial de impacto ambiental são as que mais participam do ISE B3.

Em Zacharias et al. (2023), é mostrada a evolução do ISE B3, com revisão dos precedentes históricos, sua fundamentação, os questionários e as cinco dimensões avaliadas: capital humano, governança corporativa e alta gestão, modelo de negócio e inovação, capital social, meio ambiente, em um total de 259 indicadores. Souza (2022) analisou o questionário do ISE B3 e concluiu que os critérios referentes aos desempenhos ambiental, social e econômico-financeiro tiveram respostas que cumpriram os requisitos solicitados no questionário, o que não ocorreu para a dimensão social. Segundo a autora, isso implica necessidade de aprimoramento no que tange à responsabilidade social empresarial. O questionário atual pode ser encontrado em ISE B3 (2023b). A metodologia do ISE B3 pode ser vista em ISE B3 (2023a).

Indicadores e índices de sustentabilidade na agropecuária

O termo agricultura sustentável foi cunhado com base no chamado Relatório Brundtland (*Brundtland Report*), publicado em 1987 (United Nations, 1987), e considera o paradigma do desenvolvimento sustentável. Desde então, o conceito de sustentabilidade na agropecuária tem se destacado nos debates da política agropecuária e tem sido bastante discutido na literatura científica e em relatórios de organizações internacionais (Latruffe et al., 2016a, 2016b; Streimikis; Baležentis, 2020). Segundo Schaller (1993), agricultura sustentável implica uma atividade ambientalmente correta, produtiva, economicamente viável e socialmente justa.

Conforme citam Ali e Perna (2021), a atenção crescente da literatura sobre sustentabilidade em agricultura deve-se também à discussão sobre os ODS, apesar de ainda não haver consenso sobre um conjunto coerente de indicadores. Um editorial da revista científica *Nature*, de setembro de 2023 (Editorials [...], 2023), afirma que, apesar de os ODS influenciarem as discussões políticas, ainda há poucas evidências de que estejam promovendo mudanças substanciais nas políticas ou nos gastos dos governos.

Há mais de 70 definições para o conceito de sustentabilidade em agricultura, as quais se diferenciam em prioridades, objetivos e valores para as partes interessadas (Streimikis; Baležentis, 2020). As discussões sobre o tema revelam a importância de monitorar e avaliar as práticas e tecnologias agrícolas, bem como selecionar indicadores apropriados para medir suas diferentes dimensões.

Para alcançar a sustentabilidade na agropecuária, é fundamental o desenvolvimento de práticas e tecnologias agrícolas que simultaneamente respeitem o meio ambiente, sejam acessíveis e eficientes para os produtores, impulsionem a produtividade e gerem benefícios para os serviços e bens ambientais. Deve, ainda, incorporar conceitos de resiliência e persistência, além dos resultados econômicos, sociais e ambientais mais amplos, visto que implica produção agrícola que garanta a oferta de alimentos, a estabilidade ecológica, a viabilidade

econômica e a permanência sociocultural (Suresh et al., 2022; Pretty, 2008; Tilman et al., 2002).

Conforme discute Schaller (1993), há uma visão antagônica sobre sustentabilidade em agricultura. Se há os que argumentam que a agricultura sustentável é inerentemente não lucrativa e não alimentaria a população mundial tanto quanto a agricultura convencional, por outro lado, há os que acreditam que a agricultura sustentável pode ser ainda mais lucrativa do que a convencional, especialmente se, além dos custos, forem considerados na estimativa do lucro todos os benefícios gerados (por ex. conservação de recursos naturais, proteção do meio ambiente, implicações da sustentabilidade para as comunidades rurais e a sociedade como um todo etc.).

Para Velten et al. (2015), Roy e Chan (2012), apesar da ambição para definição do que seja sustentabilidade em agricultura, uma agricultura sustentável deveria garantir solidez ecológica, viabilidade econômica e aceitabilidade social. Para tal, e de acordo com esses autores, a atividade agrícola precisaria considerar a compensação, a interdependência/interação e os potenciais conflitos entre economia, ambiente e sociedade.

Conforme já mencionado, a literatura é profícua em propostas na temática de sustentabilidade em agricultura, sejam para a proposição de definições, de dimensões, de indicadores ou de índices compostos. Pesquisas feitas nas bases bibliográficas *Scopus*⁴ e *Web of Science*⁵, em março de 2025, com expressão genérica de busca “(*indicators OR indices OR index OR indexes*) AND *sustainability AND agriculture*” retornaram cerca de 5 mil e 13 mil documentos nestas bases, respectivamente, com datas de publicação entre 1990 e 2025⁶. Os resultados dessas buscas mostram aumento crescente de publicações ao longo

⁽⁴⁾ Disponível em: <https://www.scopus.com>.

⁽⁵⁾ Disponível em: <https://www.webofscience.com>.

⁽⁶⁾ Observe-se que são necessários refinamentos nessas pesquisas, de modo a gerar listagem de publicações mais específica e aderente ao objeto de estudo.

do tempo, em especial a partir de 2010. Citam-se brevemente, a seguir, um pequeno número dessas publicações.

Revisões sistemáticas da literatura, análises bibliométricas sobre indicadores, índices e ferramentas/métodos de avaliação de sustentabilidade em agricultura, além de elaboração de ferramentas conceituais, foram objeto de interesse de diversos autores. Nesse contexto, podem ser citados os trabalhos de OECD (European Union, 1999a, 1999b, 2001), Parris (2000), Rigby et al. (2000), Woodhouse et al. (2000), Pretty (2008), Bockstaller et al. (2009), Binder et al. (2010), Roy e Chan (2012), Velten et al. (2015), Latruffe et al. (2016b), Slätmo et al. (2017), Rao et al. (2019), Neto e Cunha (2020), Streimikis e Baležentis (2020), Ali e Perna (2021), Chopin et al. (2021), Nadaraja et al. (2021); Alaoui et al. (2022), Silvestri et al. (2022), Yu e Mu (2022), Bathaei e Štreimikiene (2023), Zahm et al. (2024), Voisin et al. (2025), Zarbà et al. (2025).

O ponto que emerge das referências citadas no parágrafo anterior é a confirmação de que indicadores são a base de estudos que se dedicam a medir e a avaliar a sustentabilidade na agropecuária. Parte do esforço está em sumarizar e agrupar os indicadores em dimensões que os representem, usualmente, econômica, social e ambiental. Acrescente-se que o pilar ambiental da sustentabilidade é o mais abordado e citado historicamente. Nele, os indicadores mais usados referem-se à erosão do solo, diversidade/diversificação de culturas e uso de pesticidas. Em contrapartida, o pilar econômico é o que parece suscitar maior interesse recente, com indicadores relativos à lucratividade, à produtividade e à renda agrícolas. Outra menção comum é sobre a participação das partes interessadas na seleção dos indicadores, de modo que a comunicação dos resultados da avaliação seja mais efetiva.

Outra percepção que surge desses estudos é a necessidade de evolução dos estudos de avaliação de sustentabilidade na agropecuária, em termos de: métodos estatísticos e quantitativos usados, que deveriam se tornar “mais científicos”; exigência de refinamento dos indicadores (definição e cálculo), haja vista a grande quantidade de medidas propostas na literatura; importância da definição de subgrupos

ou subdimensões dentro dos pilares tradicionais de sustentabilidade ou de novas dimensões, como saúde e nutrição, e governança responsável; inclusão da dimensão institucional ou governamental; avanço no entendimento das inter-relações entre as dimensões econômica e social, particularmente no que concerne a características do produtor, viabilidade, estabilidade e risco dos sistemas produtivos.

Especificamente sobre a dimensão ambiental, pode-se citar a revisão de índices e indicadores de sustentabilidade realizada por Brouwer e Crabtree (1998), Mamat et al. (2016), Gómez-Limón et al. (2020). Saleh e Ehlers (2025) afirmam que o aspecto social da sustentabilidade é o de menor entendimento, em especial sobre suas relações com as demais dimensões. Nesse sentido, são de importância as revisões sistemáticas de Desiderio et al. (2022) e de Sannou et al. (2023) sobre indicadores de sustentabilidade social. Bolfe (2019) traz uma discussão sobre a importância do uso de geotecnologias (sensoriamento remoto e bases geoespaciais) como subsídio e suporte ao planejamento rural e no monitoramento de práticas agrícolas sustentáveis.

Outros autores definiram indicadores e índices de sustentabilidade na agropecuária para casos específicos, como para países ou outras entidades geográficas (Dillon et al., 2010; Roy e Chan, 2012; Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, 2013; Kelly et al., 2018; Rao et al., 2019; Suresh et al., 2022; Cirone et al., 2023), cadeias e sistemas agroalimentares (Ruiz-Almeida; Rivera-Ferre, 2019; Carvalho et al., 2022; Desiderio et al., 2022; Silvestri et al., 2022; Arcese et al., 2023; Castillo-Díaz et al., 2023; Cirone et al., 2023; Sannou et al., 2023), sistemas de produção agrícola ou florestal (Pacini et al., 2009; Oliveira et al., 2013; Hanisch et al., 2019; Maesano et al., 2021; Nadaraja et al., 2021), sistemas de produção animal (Lebacqz et al., 2013; Ruiz et al., 2017; Aragão et al., 2022) e estabelecimentos rurais ou fazendas (Gomez et al., 1997; Van Passel et al., 2007; Fernandes; Woodhouse, 2008; Zahm et al., 2008; Gomes et al., 2009; Thivierge et al., 2014; Latruffe et al., 2016a; O'Donoghue et al., 2016; Olde et al., 2016; Ryan et al., 2016; Areal et al., 2018; Tzouramani et al., 2020; D'Angelcola et al., 2021; Fonseca et al., 2021;

Veiga et al., 2021; Ait Sidhoum et al., 2020, 2022; Souza et al., 2022; Robling et al., 2023; Arru et al., 2024; Bi et al., 2024; Sinisterra-Solís et al., 2024; Viana et al., 2024; Ibrahim et al., 2025).

Algumas iniciativas na Embrapa

A construção de indicadores e índices de sustentabilidade para avaliar sistemas de produção agropecuários é uma preocupação de longa data na Embrapa. Uma busca realizada em abril de 2025 na base Quaesta – Projetos de Pesquisa da Embrapa⁷, utilizando os termos de busca (“indicadores de sustentabilidade” OR “índices de sustentabilidade”), identificou 253 projetos de pesquisa (33 em execução), com datas de início entre 1994 e 2025. A consulta à Base de Dados da Pesquisa Agropecuária (BDPA)⁸, realizada em setembro de 2024, com os termos “indicadores de sustentabilidade”, “índice de sustentabilidade”, “sustainability indicators” e “sustainability indices” resultou, respectivamente, em 49, 15, 21 e 13 artigos publicados em periódicos científicos de autoria de empregados da Embrapa, com ano de publicação entre 2000 e 2025, observando-se um aumento ao longo do período⁹. Estes achados estão em concordância com aqueles das bases bibliográficas mencionadas anteriormente, tanto no aspecto temporal (início na década de 1990) quanto no de interesse (aumento do número de publicações ao longo do tempo).

Em 2003, foi constituído na Embrapa um grupo de trabalho¹⁰ para “sistematizar os principais indicadores, índices e métricas para componentes agro-socioambientais e florestais com base em protocolos gerados a partir de informações científicas robustas, reconhecidos

(7) Disponível em: <https://sistemas.sede.embrapa.br/quaesta>.

(8) Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta>.

(9) Cabe mencionar que pode haver dupla contagem de publicações com uso dos termos em português e em inglês, singular e plural.

(10) Grupo de trabalho constituído através da Resolução do Diretor-executivo - DEPI N° 28, de 31 de julho de 2023. BCA N° 38/2023.

nacional e internacionalmente, em acordo às demandas oficiais do Mapa e de outros ministérios, em atenção aos fóruns e acordos globais, à iniciativa privada e às orientações de organismos internacionais tais como FAO, OECD, UNFCC, ONU, dentre outros. Adicionalmente, o GT deverá identificar eventuais lacunas de CT&I que mereçam atenção da Diretoria-Executiva, visando subsidiar a qualificação e tomada de decisão relacionada à agenda de PD&I da Embrapa no tema.”. O relatório deste grupo de trabalho concentrou-se na dimensão ambiental da sustentabilidade, e recomenda, dentre outros pontos, o aprimoramento da governança de dados agroambientais nos âmbitos nacional e internacional (Embrapa, 2023a).

Os fatos mencionados nos dois parágrafos anteriores são sugestivos da importância que a temática tem na Empresa há cerca de três décadas. A seguir, destacam-se algumas iniciativas institucionais na temática sobre indicadores e índices de sustentabilidade, selecionadas de forma subjetiva e sem a intenção de exaurir o tema.

Avaliação ponderada de impacto ambiental de atividades do novo rural (APOIA-NovoRural)

O sistema APOIA-NovoRural, liderado pela Embrapa Meio Ambiente, consiste em um conjunto de 62 indicadores de desempenho de uma atividade econômica em um estabelecimento rural (Rodrigues; Campanhola, 2003). Os indicadores são agrupados em cinco dimensões: ecologia da paisagem, qualidade ambiental (atmosfera, água e solo), valores socioculturais, valores econômicos e gestão, e administração. Dados quantitativos obtidos em campo e em laboratório são transformados em índices de impacto, por meio de matrizes de ponderação, e expressos graficamente. Funções e coeficientes derivados para cada indicador são transformados em valor de utilidade, os quais compõem o Índice de Impacto Ambiental da atividade avaliada.

Segundo Rodrigues e Campanhola (2003), os resultados da avaliação possibilitam que o produtor identifique atributos que violam seus objetivos de sustentabilidade. É ainda possível a recomendação

de medidas de fomento ou controle das atividades aos tomadores de decisão, segundo planos de desenvolvimento local, e apoio à qualificação e à certificação de atividades agropecuárias.

A Embrapa foi parceira do *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* (INTA, Argentina) na construção do *Sistema de Evaluación Ponderada de Impacto Ambiental* – SEPIA (D’Angelcola et al., 2021) e da representação uruguaia do Instituto Interamericano para Cooperação em Agricultura (IICA) na elaboração do *Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental Rural* – EIAR (Rodrigues; Moreira, 2007), que constituem ferramentas de suporte à gestão sustentável de territórios e dos estabelecimentos rurais. Os sistemas são adaptações do APOIA-NovaRural às realidades locais, compostos pelas mesmas cinco dimensões e com indicadores selecionados. Estudos de caso com o uso do sistema APOIA-NovaRural ou suas adaptações podem ser vistos, por exemplo, em Rodrigues et al. (2010, 2018) e Mendes et al. (2023).

Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas

Segundo Marques et al. (2003), o projeto de pesquisa “Desenvolvimento de metodologias para definição e monitoramento de indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas”, liderado pela Embrapa Meio Ambiente, demonstrou que a relação agricultura x meio ambiente pode ser avaliada por indicadores de sustentabilidade com potencial para subsidiar tomadas de decisão em âmbitos de atuação diversos. O entendimento dos autores é de que a redução da diversidade biológica, erosão e contaminação do solo, contaminação e assoreamento dos mananciais, entre outros, podem ser traduzidos por variações na produção e na produtividade agrícolas e no bem-estar socioeconômico de uma comunidade.

Para os autores, a sustentabilidade é entendida sob três dimensões: ecológica (estabilidade do ambiente e dos recursos naturais), econômica (rentabilidade) e social (equidade entre os membros da sociedade). É apresentada uma seleção de indicadores de

sustentabilidade de agroecossistemas, em abordagem teórica sobre o tema e aplicada a um estudo de caso.

Fazenda pantaneira sustentável (FPS)

O sistema FPS é uma ferramenta de suporte à decisão que tem como objetivo avaliar a sustentabilidade da pecuária de corte em sistemas ambientais tropicais complexos, incertos e dinâmicos, como o Pantanal (Santos et al., 2017). A iniciativa foi liderada pela Embrapa Pantanal, em parceria com a Embrapa Agricultura Digital e a Embrapa Agrobiologia¹¹.

Os indicadores são integrados por um sistema baseado em regras *fuzzy* para avaliar os atributos da sustentabilidade. Indicadores e regras de decisão foram obtidos em reuniões com equipe multidisciplinar de especialistas. A lógica difusa (*fuzzy*) permite lidar com as incertezas inerentes ao bioma Pantanal, as faixas dinâmicas dos indicadores e com as opiniões dos especialistas na criação de regras de decisão inseridas no modelo (Maio, 2017). O sistema FPS gera uma escala quanto ao grau de sustentabilidade (bom, regular, ruim) para cada atributo, dimensão e globalmente.

No sistema FPS, a dimensão ambiental é composta pelos atributos conservação da biodiversidade (composta por dois indicadores), conservação de corpos d'água (quatro indicadores) e conservação e produtividade de pastagens (três indicadores). Na dimensão econômica, os atributos são gestão e bem-estar do rebanho (três indicadores) e viabilidade econômica (três indicadores). A dimensão social compreende o atributo bem-estar da comunidade rural, composto por cinco indicadores. Para cada atributo que compõe o sistema FPS, foram produzidos e publicados protocolos dirigidos a produtores e outros públicos de interesse (Santos et al., 2014, 2015; Soares et al., 2014; Abreu et al., 2015; Amâncio et al., 2016).

(11) Disponível em: <https://www.fps.cnptia.embrapa.br/fps/>.

Atualmente, o sistema FPS é utilizado em um projeto piloto em 15 fazendas com o objetivo de apoiar o desenvolvimento econômico e sustentável de produtores rurais do bioma Pantanal de Mato Grosso. O projeto piloto é coordenado pela Federação da Agricultura e Pecuária de Mato Grosso, Serviço Nacional de Aprendizagem Rural de Mato Grosso, Associação dos Criadores de Mato Grosso e Embrapa Pantanal, em parceria com o Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária e Sindicatos Rurais.

Indicadores de desempenho e índice multicritério de sustentabilidade para agricultura familiar no bioma Amazônia

Este índice e os indicadores de sustentabilidade relacionados integram o projeto “Inclusão Geodigital e Gestão Territorial de Unidades de Produção de Base Familiar: Geração de Índice de Sustentabilidade para o Bioma Amazônia (IGGTS)”, liderado pela Embrapa Territorial. Este foi um dos projetos componentes do Projeto Integrado para a Produção e Manejo Sustentável do Bioma Amazônia, do Fundo Amazônia (Mangabeira et al., 2021).

A abordagem metodológica proposta e aplicada avalia sistemas de produção, individual ou coletivamente, por meio de indicadores agrupados nas dimensões governança (cinco indicadores), ambiental (seis indicadores), social (cinco indicadores), econômica (cinco indicadores) e agronômica (dez indicadores). A avaliação pode ser feita por dimensão, considerando os vários indicadores, ou por meio de um índice de sustentabilidade global, de caráter multicritério.

Os indicadores foram definidos por meio de uma abordagem participativa e construtivista (painéis, trabalhos em grupo, oficinas em campo), de modo a considerar a percepção e a experiência dos atores locais sobre sustentabilidade. A definição dos fatores de ponderação dentro de cada dimensão (intracritério) e para a geração do índice de sustentabilidade global (intercritério) foi feita com base em opiniões de decisores (integrantes do projeto, técnicos e representantes das comunidades dos estados da Amazônia Legal).

Modelo de lógica fuzzy

Dado que os processos agrícolas são complexos por envolverem múltiplos critérios e que pode haver conflitos para definir limites para diferenciar “sustentável” e “não sustentável”, Reis et al. (2023) afirmam que a lógica *fuzzy* seria a abordagem adequada para desenvolver indicadores de sustentabilidade. Os autores, de diferentes Unidades Descentralizadas da Embrapa e de instituições parceiras, propuseram um novo modelo de lógica *fuzzy* baseado em indicadores para avaliar a sustentabilidade de 22 propriedades rurais em região de fronteira agrícola-florestal brasileira. Estes estabelecimentos representam os três sistemas de produção agrícola mais comuns naquela região: agricultura (rotação de culturas, soja-milho), pecuária, sistema integrado (agricultura-pecuária e pecuária-floresta).

Os autores propuseram 18 indicadores de sustentabilidade nas dimensões econômica, ambiental e social, integrados em um índice de sustentabilidade. A definição dos indicadores foi baseada na disponibilidade de dados, possibilidade de uso em regiões e sistemas agrícolas distintos, e na suficiência e completude para avaliar sustentabilidade na escala da propriedade rural. O conjunto de regras *fuzzy* foi criado com base em conhecimentos de um grupo de especialistas (oito pesquisadores seniores da Embrapa).

De acordo com os autores, o sistema de inferência *fuzzy* usado pode ser adaptado a diferentes contextos ambientais e socioeconômicos, a especificidades regionais e dos sistemas de produção, ao conhecimento de diferentes especialistas e à disponibilidade de dados e informações. Os autores pretendem conduzir estudos regionais e avaliar a contribuição de sistemas integrados para o efeito poupa-terra e para a expansão agrícola em fronteira agricultura-floresta.

SustenAgro

O SustenAgro é um sistema/*software* de apoio à decisão que possibilita avaliar a sustentabilidade de sistemas de produção de cana-de-açúcar da região Centro-Sul do Brasil, tomando por base indicadores de sustentabilidade categorizados nas dimensões social, ambiental e

econômica (Embrapa, 2023b). Os indicadores foram formulados a partir de dados secundários e validados em consulta a especialistas do setor.

Segundo Jesus et al. (2019), o SustenAgro é um sistema de auto-avaliação que objetiva melhorar a eficiência e a sustentabilidade das unidades produtivas que não estão sujeitas a um processo formal de certificação. O sistema está organizado em duas etapas de avaliação: índice de eficiência agrícola e industrial; índices de sustentabilidade da cana-de-açúcar (ambiental, social e econômica). No índice de eficiência, são considerados também custos de produção. No índice de sustentabilidade, os indicadores são selecionados pelo usuário de acordo com a aderência ao sistema de produção em avaliação. Os indicadores em cada dimensão são ponderados (pesos 1, 2 e 3), com maior peso significando maior impacto. As dimensões têm a mesma ponderação na construção do índice final. Em Jesus et al. (2019) encontram-se listados e definidos os indicadores de cada etapa, bem como pesos e valores atribuídos.

Os resultados da avaliação são apresentados na forma de uma matriz, que possibilita uma visão eficiência x sustentabilidade, e de um semáforo da sustentabilidade, que indica o nível de sustentabilidade do sistema avaliado.

Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas (ISA)

O sistema ISA é uma ferramenta de avaliação do desempenho econômico, social e ambiental de estabelecimentos rurais, elaborado no âmbito de um projeto desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Embrapa Milho e Sorgo, Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais, Instituto Estadual de Florestas, Fundação João Pinheiro e Universidade Federal de Minas Gerais. O sistema é composto por 23 indicadores, agrupados em sete categorias (Ferreira et al., 2012, 2014): balanço econômico (produtividade e preço de venda apurados; perfil e diversificação da renda; evolução patrimonial; grau de endividamento), balanço social (serviços básicos disponíveis; segurança alimentar no entorno das

residências; escolaridade/cursos direcionados às atividades agrossilvipastoris; qualidade da ocupação e do emprego gerado), gestão do estabelecimento rural (gestão do empreendimento; gestão da informação; gerenciamento de resíduos e efluentes; segurança do trabalho e gestão do uso de agrotóxicos e produtos veterinários), capacidade produtiva do solo (fertilidade do solo), qualidade da água (qualidade da água superficial; qualidade da água subterrânea; risco de contaminação da água por agrotóxicos), manejo dos sistemas de produção (áreas com solo em estágio de degradação; grau de adoção de práticas conservacionistas; estado de conservação de estradas internas e externas), e ecologia da paisagem agrícola (vegetação nativa – fitofisionomias e estado de conservação, áreas de preservação permanente; reserva legal; diversificação da paisagem agrícola).

No sistema ISA, cada indicador tem valor entre 0 e 1, e o índice final do estabelecimento avaliado é dado pela média aritmética simples dos 23 indicadores de sustentabilidade, sendo 0,7 considerado o valor de corte para bom desempenho.

A ferramenta de avaliação está disponível para uso por meio do aplicativo ISApp (Marques; Ferreira, 2017) e está incorporada ao trabalho da assistência técnica (EPAMIG, 2025).

Indicadores de aquicultura sustentável: rede de pesquisa em aquicultura sustentável

Trata-se de um conjunto de 56 indicadores quantitativos classificados nas dimensões econômica (14), ambiental (22) e social (20) da sustentabilidade, que tem como objetivo avaliar a sustentabilidade da aquicultura e melhorar os processos de produção aquícolas (Valenti et al., 2018; Kimpara et al., 2018).

Segundo Valenti et al. (2018), por serem amplos, cientificamente sólidos, fáceis de entender, interpretar e de obter em fazendas ou em estações de pesquisa, esses indicadores permitem a comparação em diferentes escalas de espaço (propriedade, regional, global, setorial) e de tempo. Podem também ser usados por organizações certificadoras, consumidores, investidores e formuladores de políticas.

Índice de sustentabilidade Auera (ISA)

Resultado do Projeto Auera, o ISA (Pereira et al., 2024) tem como objetivo avaliar a sustentabilidade em propriedades agrícolas familiares, a partir de um conjunto de indicadores categorizados em dimensões e eixos: eixo socioeconômico, para representar a dimensão social; eixos água, gestão de resíduos, conformidade ambiental, fauna e flora, caracterizando a dimensão ambiental; eixos solo e agrobiodiversidade, para definir a dimensão produtiva.

O grau de sustentabilidade de cada propriedade calculado pelo ISA é inspirado no sistema de notas usado pelo método MESMIS – *Marco para Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad* (Masera et al., 1999). Os valores de cada indicador são convertidos em classes e a cada classe é atribuída uma nota. O número de classes (duas a cinco, entre excelente e péssimo) é definido pelo pesquisador para cada indicador individualmente.

Cabe ainda mencionar iniciativas de desenvolvimento de indicadores e de índices que, apesar de não expressarem diretamente a sustentabilidade, relacionam-se ao tema ao avaliar qualidade ou impacto na agropecuária. Destacam-se, entre outros:

- Índices de qualidade da estrutura do solo, derivados do método DRES – Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (Ralisch et al., 2017);
- Índices de qualidade do solo, atrelados ao uso do BioAS – Tecnologia de Bioanálise de Solo e derivados de propriedades químicas e biológicas do solo (Mendes et al., 2021);
- Índice de qualidade participativo do sistema plantio direto (Martins et al., 2020; Telles et al., 2020);
- Indicadores de desempenho ambiental e índice de impacto gerados pelo Ambitec-Agro – Sistema de Avaliação de Impactos Ambientais de Inovações Tecnológicas Agropecuárias (Rodrigues, 2015), utilizados nos relatórios de impacto das tecnologias da Embrapa e que compõem o Balanço Social¹².

⁽¹²⁾ Disponível em: <https://www.embrapa.br/balanco-social>.

Índices compostos

A construção de um modelo para descrever uma dada realidade depende de hipóteses sobre o objetivo do modelo (qual a pergunta que se deseja responder, por ex., como avaliar a sustentabilidade de certa instância), a escala da análise (individual, local, regional, nacional, internacional) e o conjunto de dimensões, objetivos e/ou critérios a serem usados no processo de avaliação e de decisão (Munda, 2004). Dada a presença usual de múltiplos critérios de avaliação ou indicadores (e de objetivos potencialmente conflitantes), é conveniente reduzir a dimensionalidade do problema para que possa ser interpretado. Nesse sentido, a proposição e a construção de indicadores ou índices compostos, que sintetizam a complexidade da realidade em questão, tornam-se relevantes.

Definição de indicadores

Indicadores são medidas utilizadas para avaliar atributos específicos da unidade de observação, podendo assumir natureza qualitativa ou quantitativa. Em geral, são construídos a partir da combinação de múltiplas variáveis ou métricas, que representam dimensões relevantes do objeto de estudo. Ao sintetizar informações sobre sistemas complexos, os indicadores possibilitam análises, interpretações e julgamentos sobre o contexto analisado. Ressalta-se que sua construção possui caráter subjetivo, pois reflete escolhas metodológicas e preferências daqueles responsáveis por sua definição.

Os indicadores podem ser construídos de diversas formas, dependendo da natureza das variáveis que os compõem (France, 2005): indicadores quantitativos e objetivos (definidos como valores diretamente mensuráveis); indicadores qualitativos e objetivos (são não mensuráveis, mas requerem respostas objetivamente verificáveis, por ex., presença ou ausência); e, indicadores qualitativos e subjetivos (avaliação ou opinião, por ex., confiança, satisfação etc.).

A medição e a análise sistemática de indicadores em intervalos regulares permitem identificar tendências e alterações ao longo do tempo, constituindo uma ferramenta estratégica para a definição de prioridades, comparação e monitoramento do desempenho de políticas.

Em geral, a seleção de indicadores é subjetiva e deriva de uma ampla lista de possíveis candidatos. Para Dizdaroglu (2017), a mensurabilidade é condição necessária na proposição de um conjunto de indicadores. O autor destaca custo-benefício, facilidade de compreensão, confiabilidade científica e comparabilidade como fatores que também devem ser considerados na escolha de indicadores.

Conforme discutido em Mayer (2008), a escala dos dados disponíveis e seus limites, a inclusão, a transformação e a ponderação dos dados do indicador e, por fim, o método de agregação utilizado interferem no comportamento do(s) índice(s) e podem influenciar a tomada de decisão. Acrescente-se a necessidade de definir o contexto, o objetivo e a escala geográfica (Dizdaroglu, 2017), de modo que sejam corretamente interpretados e usados para avaliação, monitoramento e definição de políticas.

Girardin et al. (1999) propõem sete etapas para a definição de indicadores: definição dos objetivos; seleção dos usuários; construção do indicador; determinação de parâmetros e limiares de veto; análise de sensibilidade; análise estatística; análise de utilidade.

Em alguns casos, indicadores podem ser usados como critérios de avaliação. De fato, na literatura encontram-se abordagens de agregação de indicadores em índices compostos baseadas em métodos multicritério de apoio à decisão (Keeney; Raiffa, 1993; Roy; Bouyssou, 1993; Barba-Romero; Pomerol, 1997; Belton; Stewart, 2003; Bouyssou et al., 2000, 2011). Nesses métodos, as características das unidades de observação (denominadas “alternativas” na terminologia multicritério) ou os eixos de avaliação a partir dos quais é possível comparar as observações são chamados de atributos. Quando se adiciona ao atributo alguma informação relativa às preferências do decisor, os atributos são convertidos em critérios.

Critérios são os fatores-chave que formam a base da avaliação e são definidos em uma etapa inicial de estruturação do problema. É nessa etapa que os aspectos relevantes para o problema são revelados, e as ideias são organizadas de modo a clarificar objetivos e ações, e possíveis lacunas são identificadas. A estruturação do problema pode ser feita, por exemplo, por mapas cognitivos (Eden, 1988) ou em processos de negociação e de tomada de decisão em grupo (Vieira et al., 2020; Almeida et al., 2019; Marozzi et al., 2024).

Ao considerar indicadores como critérios, o conjunto ou a família de critérios, para ser coerente, deve satisfazer a três condições (“axiomas de Roy”) (Roy e Bouyssou, 1993): exaustividade (deve escrever o problema considerando todos os aspectos relevantes), coesão (correta definição de quais são os critérios de minimização – “quanto menor, melhor” – e quais são os de maximização – “quanto maior, melhor”), não redundância (eliminação de critérios que avaliem aspectos já avaliados em outros critérios). Belton e Stewart (2003) completam esta lista, ao afirmar que os critérios que emergem do processo de estruturação devem ainda ser compreensíveis, mensuráveis, independentes quanto aos julgamentos de valor, operacionais e simples.

Aspectos gerais sobre índices compostos

Índices compostos são grandezas adimensionais resultantes da agregação matemática de múltiplos indicadores individuais, cada um refletindo diferentes dimensões de um mesmo conceito ou fenômeno. São, portanto, medidas unidimensionais que têm caráter multidimensional. Para combinar os indicadores individuais em uma medida única, recorre-se, usualmente, a uma estrutura de pesos ou coeficientes de ponderação, que podem representar importância relativa, taxas de substituição ou constantes de escala de cada indicador na formação do índice composto. Alternativamente, os pesos podem ser derivados dos dados, expressando contribuição para a formação de um fator comum.

Dialga e Giang (2017) discutem a necessidade de um arcabouço metodológico sólido para a construção de índices compostos, de modo que a legitimidade do índice não seja questionada. As escolhas subjetivas que são feitas ao longo do processo de construção dos índices (Becker et al., 2017) motivam análises de incertezas e análises de sensibilidade, que permitem inferir sobre a qualidade dos indicadores propostos (Saisana et al., 2005).

Em Saisana et al. (2005), Nardo et al. (2005) e European Union/OECD/EC-JRC (2008), são elencados pontos positivos e negativos dos índices compostos, sumarizados abaixo. Essa lista representa pontos de atenção às diversas etapas de definição de indicadores e de dimensões parciais, bem como dos índices compostos delas derivados.

Pontos positivos:

- Resumem realidades complexas e multidimensionais, sem reduzir a base de informações subjacente, com o objetivo de apoiar tomadores de decisão.
- Auxiliam na redução da dimensão de uma lista de indicadores ou na inclusão de mais informações dentro do limite da dimensão considerada.
- Facilitam a interpretação quando comparados com um grande número de indicadores individuais.
- Permitem analisar a evolução temporal da instância de avaliação escolhida, já que estimar tendência para cada indicador individual pode ser tarefa não trivial.
- Contribuem para a comunicação com o público em geral.

Pontos negativos

- Podem enviar mensagens enganadoras e não robustas se forem mal construídos ou mal interpretados, o que pode fomentar conclusões simplistas (análise de sensibilidade pode testar a robustez dos indicadores compostos; conclusões mais completas

devem considerar os indicadores compostos de cada dimensão e subindicadores).

- Necessidade de princípios estatísticos sólidos para as fases da construção de indicadores compostos em que seja necessário emitir julgamentos de valor por parte dos decisores (seleção de subindicadores, escolha do modelo, ponderação dos indicadores, tratamento de valores ausentes etc.).
- Elevada quantidade de dados (são necessários dados para todos os subindicadores e para uma análise estatisticamente significativa).

Em Nardo et al. (2005), European Union/OECD/EC-JRC (2008) e Dialga e Giang (2017), entre outros, são apresentadas recomendações sobre como conceber, desenvolver e divulgar um índice composto. Conforme as discussões desses autores, as etapas dessa construção resumem o quadro teórico de seleção de indicadores individuais e sua combinação em um índice composto alinhado ao objeto e ao objetivo de estudo. Essas etapas podem ser assim resumidas:

- **Seleção dos dados:** a seleção de dados e de indicadores deles derivados deve considerar solidez analítica, mensurabilidade, cobertura geográfica e escala, e relevância.
- **Atribuição de valores ausentes (*missing data*) e análise de valores atípicos (*outliers*):** deve-se avaliar as diferentes abordagens para lidar com valores ausentes (métodos de supressão de casos, imputação simples de dados, imputação múltipla de dados) e examinar potenciais valores atípicos, visto que estes podem causar desequilíbrio nos resultados ou podem servir de referência (*benchmark*).
- **Normalização/padronização:** para que sejam comparáveis, os indicadores devem ser normalizados/padronizados, com atenção à presença de valores atípicos e às transformações de escala.

- **Análise multivariada:** após a definição dos indicadores, uma análise exploratória multivariada permite avaliar sua estrutura global e a adequação do conjunto de dados (medidos em escala de intervalos, razão ou ordinais), além de orientar as escolhas dos métodos de ponderação e agregação.
- **Ponderação e agregação:** etapas centrais da construção de índices compostos, em geral a escolha do método de ponderação impõe o método de agregação. A estrutura de pesos tem influência importante no índice composto gerado e é essencialmente baseada em julgamentos de valor. Dessa forma, os métodos de ponderação devem ser explícitos e transparentes. Deve-se atentar às questões de correlação e de compensação entre os indicadores.
- **Análises de robustez e de sensibilidade:** servem ao propósito, por exemplo, de avaliar a influência da inclusão ou exclusão de indicadores individuais no índice composto, de avaliar os métodos de normalização e de imputação de dados, as escolhas de pesos e do método de agregação. Esta etapa é responsável por avaliar e garantir a qualidade do índice composto construído.
- **Apresentação e visualização:** a escolha da abordagem de apresentação e visualização dos índices compostos pode influenciar sua interpretação e aceitação por tomadores de decisão e usuários. Deve prover sinais e alertas para a intervenção de políticas.

Girardin et al. (1999) afirmam que as dificuldades de aceitação de índices compostos referem-se à simplificação, derivada da agregação de várias informações, e à justificativa quanto ao seu valor científico. Para eles, contudo, a avaliação crítica do valor de um indicador ou índice composto deveria ser feita com base nas qualidades que se deseja destas medidas, como sensibilidade, confiabilidade, compreensibilidade e facilidade de uso.

Resumem-se a seguir alguns aspectos das etapas de normalização de dados, ponderação e agregação.

Normalização de dados

Os indicadores a serem agregados em um índice composto são, em geral, expressos em diferentes unidades de medida. É recomendado que sejam normalizados ou padronizados antes de serem ponderados e agregados, de modo que as escalas sejam comparáveis.

Há na literatura uma gama de métodos de normalização (Barba-Romero; Pomerol, 1997; Nardo et al., 2005; European Union/OECD/EC-JRC, 2008; Tofallis, 2014; Dialga; Giang, 2017; Talukder et al., 2017; Walesiak, 2018). A escolha do método de normalização interfere nos resultados; pode gerar ordenações diferentes baseadas no escore agregado ou índice composto. Cada método mantém certa característica do conjunto de dados: uns respeitam a proporcionalidade, outros a cardinalidade, e há ainda os que valorizam a concentração. Cabe observar que o método de normalização interfere na escolha subsequente dos métodos de ponderação e de agregação. Walesiak (2018) relaciona cerca de duas dezenas de métodos de normalização. Resumem-se, a seguir, apenas alguns desses métodos.

- Uso de ordenações (*ranks*): é a técnica mais simples e não tem interferência de valores atípicos. Para cada indicador, as observações são ordenadas e seus postos (posições ou *ranks*) são definidos. Cabe observar que todos os indicadores devem estar ordenados na mesma direção de associação com o índice composto (maximização ou minimização).
- Divisão pelo máximo: a observação que tem maior valor no indicador recebe valor 1. As demais observações têm seus valores divididos por esse valor máximo. Os valores resultantes podem ser interpretados como uma fração (ou percentual) do máximo. A proporcionalidade é preservada nesta transformação.

- Normalização por intervalo: assegura que todos os indicadores estejam medidos no intervalo $[0, 1]$. A observação com maior valor no indicador tem seu valor convertido para 1 e a de menor valor tem valor convertido para zero. Este é o método mais usado na construção de indicadores de sustentabilidade, incluindo o IDH. No entanto, Barba-Romero e Pomerol (1997) e Tofallis (2014) alertam que apesar de a cardinalidade ser preservada, a proporcionalidade não é mantida. Matematicamente, esta transformação é expressa por $[(x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})]$, para indicadores de maximização (positivamente associados ao índice composto); $[(x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_{\min})]$, para indicadores de minimização (negativamente associados), onde x é o valor a ser transformado, $x_{\min}$ é o valor mínimo do conjunto de dados e $x_{\max}$ é o valor máximo.
- z-scores (padronização estatística): os valores de cada indicador são obtidos pela subtração da média e divisão pelo desvio padrão. Após a transformação, o indicador terá média zero e desvio padrão unitário. Esta transformação é sensível à presença de valores atípicos (afeta tanto o cálculo da média, quanto do desvio padrão) e não mantém a proporcionalidade. Em contrapartida, é útil quando da presença de valores extremos e permite que indicadores individuais de diferentes distribuições possam ser comparados.

Métodos de ponderação e de agregação

Após a definição do objeto de estudo, das dimensões e respectivos indicadores e variáveis, da normalização dos indicadores em cada dimensão, a etapa seguinte é a construção do índice composto. Para tal, é necessário combinar os indicadores em cada uma das dimensões e, em seguida, combinar as dimensões em um índice agregado final (similar à sequência de uma estrutura hierárquica: variáveis, indicadores, subdimensões, dimensões, índice composto).

A construção do índice composto depende de decisão sobre os modelos de ponderação e de agregação desse conjunto de dados.

Pesos, de modo simplificado, refletem a relevância de cada indicador (ou dimensão) relativamente ao índice composto. A definição dos pesos é feita com base na explicitação (e adequada transformação) dos julgamentos de valor dos decisores. Os pesos também podem ser derivados de modelos estatísticos, que permitem que “os dados falem”. Seja pela abordagem subjetiva ou pela objetiva, Talukder et al. (2017) e Nardo et al. (2005) aconselham que, como não há um único método aceito universalmente para a determinação de pesos, estes devem ser derivados de uma base teórica clara, transparente e pactuada entre os participantes do estudo. São igualmente possíveis diferentes regras de agregação (soma, multiplicação, agregação não linear), as quais partem de hipóteses distintas e produzem resultados específicos.

Cabe observar que, nas abordagens derivadas de modelos multicritério e de modelos de análise de envoltória de dados, ponderação e agregação estão de alguma forma relacionadas à base teórica e axiomática desses modelos. Nesse sentido, não seria possível fazer uma distinção exata dessas etapas. Acrescente-se que, a depender do modelo, os pesos podem ter significados diferentes: coeficientes de importância relativa, taxas de compensação ou de substituição (*trade-offs*), contribuição para a formação do escore agregado etc.

Em Nardo et al. (2005) e European Union/OECD/EC-JRC (2008), são apresentados e descritos diferentes métodos de ponderação e de agregação, com indicação de suas vantagens e desvantagens¹³. Gan et al. (2017) apresentam e discutem nove métodos de

(13) Cabe referir que seria necessário realizar uma revisão específica sobre cada método de ponderação e de agregação, de modo a ratificar se as desvantagens ainda não foram tratadas recentemente na literatura por desenvolvimentos teóricos. No caso de modelos que usam programação matemática, como DEA, por exemplo, a velocidade da evolução teórica e de casos de aplicação tem sido grande, como comprovam as revisões feitas por Liu et al. (2013a, 2013b, 2016), Emrouznejad e Yang (2018), Zhou et al. (2018).

ponderação e três métodos de agregação mais usados na literatura. Em Gómez-Limón et al. (2020), pode ser vista uma ampla revisão sobre métodos de ponderação na construção de índices compostos de sustentabilidade.

De modo geral, deve-se atentar que a construção de um índice composto é dependente do contexto, e procedimentos de ponderação são habitualmente intensivos em tempo e em consumo de recursos (De Montis et al., 2021). Métodos que usam comparações pareadas, por exemplo, são extremamente demandantes de informação subjetiva por parte dos decisores, os quais podem emitir julgamentos de valor inconsistentes com o aumento da dimensionalidade do problema abordado. Para que haja adesão e para que os índices gerados sejam efetivamente usados, De Montis et al. (2021) sugerem que os fundamentos de todo esse processo sejam esclarecidos passo a passo.

A seguir, listam-se e caracterizam-se resumidamente algumas dessas abordagens. Detalhamentos teóricos, do ponto de vista matemático e estatístico, devem ser buscados nas referências citadas e em outras que as suplementem.

Métodos de ponderação

Pesos iguais

Estrutura de pesos que reconhece que todos os elementos a serem ponderados estão na mesma situação. Usado quando não há elementos estatísticos ou empíricos para definir uma estrutura em que os pesos sejam diferentes por elemento, seja por falta de conhecimento sobre as relações entre os elementos ou por falta de consenso dos decisores. Convém ressaltar que a atribuição de pesos iguais aos elementos de um índice composto não implica ausência de ponderação. Tal escolha reflete um julgamento de valor subjacente, que assume implicitamente a igualdade de importância ou de contribuição de cada elemento na composição do índice.

Pesos baseados em análise de componentes principais e análise fatorial

Análise de componentes principais (ACP) busca explicar a estrutura de variância e covariância de um conjunto de variáveis, por meio de combinações lineares (componentes principais) dessas variáveis originais (Johnson; Wichern, 2007; Morettin; Singer, 2023; Fávero; Belfiore, 2024). Já a análise fatorial (AF) é uma técnica de análise multivariada que busca identificar fatores intrínsecos comuns, que representem as relações entre as variáveis (inter-relacionadas) em análise (Johnson; Wichern, 2007; Morettin; Singer, 2023; Fávero; Belfiore, 2024). Dessa forma, a dimensionalidade do conjunto de variáveis é reduzida e o escore agregado gerado é uma representação do conjunto de variáveis originais.

ACP e AF permitem agrupar indicadores individuais para formar um indicador composto, que captura a informação comum dos indicadores individuais (e que devem ser medidos na mesma unidade). A ideia é considerar o máximo de variação do conjunto de indicadores, usando o menor número possível de fatores. Cada fator, estimado geralmente por ACP, revela o conjunto de indicadores com os quais tem maior associação. Se não houver associação/correlação não é possível estimar pesos por essas abordagens. Em ACP e AF, a estrutura de pesos não é uma medida da importância entre os indicadores; representam o conteúdo da informação dos indicadores individuais. Conforme European Union/OECD/EC-JRC (2008), ACP e AF são os enfoques preferidos na proposição de índices compostos, dada a simplicidade. Alertam, no entanto, que diferentes métodos de extração de fatores geram diferentes pesos e, assim, diferentes escores.

ACP e AF foram usadas, por exemplo, no cálculo de uma das componentes para a estimativa de uma função de produção da agropecuária brasileira, com base nos microdados dos censos agropecuários de 2017 (Souza; Gomes, 2023; Souza et al., 2020) e de 2006 (Souza et al., 2022). Nestes estudos, a componente índice de insumos tecnológicos foi calculada a partir da agregação de diferentes variáveis censitárias, com os pesos definidos pelas comunalidades relativas derivadas do modelo fatorial. Este é um sistema de pesos

fixos. Outros autores que usam ACP e AF em seus estudos de indicadores de sustentabilidade em agricultura são, entre outros, Barnes e Thomson (2014), Haq e Boz (2020) e Souza et al. (2022).

Pesos baseados em modelos de programação linear – modelos de análise de envoltória de dados

Modelos de análise de envoltória de dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA) (Coelli et al., 2005; Cooper et al., 2007; Cook; Zhu, 2008) têm como objetivo primário estimar um escore de eficiência ou de desempenho (índice composto) para cada observação componente de um conjunto de observações (*Decision Making Unit* – DMU, no jargão DEA). Partindo do conceito de um sistema, que gera resultados ou produtos a partir de um conjunto de recursos ou insumos, esse escore é definido como a razão entre a soma ponderada dos múltiplos produtos gerados (*outputs*) e a soma ponderada dos múltiplos recursos consumidos (*inputs*). Escores DEA são medidos no intervalo (0,1], em que 1 representa o escore máximo. Nesse sentido clássico, modelos DEA são vistos como métodos de estimativa de fronteiras de produção (Coelli et al., 2005).

Os problemas de DEA são originalmente problemas de programação matemática na forma fracionária. A partir de linearização adequada, resultam duas formulações lineares duais. De forma simplificada, a formulação conhecida como modelo do envelope define uma região viável de produção (estima uma fronteira de eficiência) e projeta cada observação na fronteira dessa região. O interesse está na identificação de *benchmarks* e alvos para as unidades ineficientes, a partir de medidas de distância até a fronteira. Já a formulação chamada de modelo dos multiplicadores trabalha com a razão de somas ponderadas de produtos e recursos (que define o escore ou índice composto). O modelo calcula o conjunto de pesos de forma mais favorável e específica para cada observação, respeitando-se determinadas condições. O interesse, neste caso, está na estrutura dos multiplicadores (pesos) que dará eficiência máxima a cada observação. Ou seja, cada observação tem seu conjunto ótimo de pesos, aquele que lhe

confere o maior valor do escore de eficiência, dadas todas as demais observações.

Os modelos DEA mais conhecidos são o modelo CRS (*constant returns to scale*), que admite retornos constantes de escala, e o modelo VRS (*variable returns to scale*), que supõe retornos variáveis de escala. Esses modelos diferenciam-se, em essência, pelas hipóteses sobre a convexidade da fronteira de eficiência. Nos modelos clássicos, não é incomum que sejam atribuídos pesos nulos às variáveis. Para contornar essa característica, é recomendado o uso de modelos DEA não arquimedianos (Cooper et al., 2007).

Segundo Cook e Zhu (2008), é possível incluir nos modelos o conhecimento sobre a importância relativa das variáveis (*inputs* e *outputs*), de modo que a escolha do conjunto de pesos seja refinada e aderente ao entendimento dos decisores. Isso, em geral, é feito pela inclusão de julgamentos de valor por meio de restrições aos pesos (Allen et al., 1997; Thanassoulis et al., 2004).

É também possível considerar no cálculo do escore de eficiência não somente os pesos que a observação calculou para si de modo a maximizar seu escore de eficiência (autoavaliação), mas também considerar os pesos que todas as demais observações atribuíram para si. Este tipo de avaliação é chamado de avaliação cruzada e permite a “avaliação pelo conjunto” (Doyle; Green, 1994, 1995)¹⁴.

DEA tem sua modelagem adaptada para uso em índices compostos por meio da abordagem chamada de “Benefício da Dúvida” (*Benefit of the Doubt*) (Cherchye et al., 2007; Su et al., 2023), originalmente proposta para avaliar desempenho macroeconômico. Entretanto, DEA pode ter uma interpretação mais ampla, a de um modelo multicritério em que *inputs* seriam critérios ou indicadores de minimização e *outputs* seriam critérios ou indicadores de maximização (Doyle; Green, 1993). Outra possibilidade é o cálculo de um índice

⁽¹⁴⁾ Cabe observar que no caso de modelos DEA servirem ao propósito de estimação de fronteiras de produção, os multiplicadores podem ser interpretados como preços-sombra (Coelli et al., 2005).

composto a partir de um modelo DEA de *input* unitário, cujos *outputs* são os indicadores a serem ponderados e agregados (Gomes et al., 2012). Esse modelo é equivalente a um modelo multicritério (Caporaletti et al., 1999; Gomes et al., 2012), com a particularidade de equivalência entre as hipóteses CRS e VRS (Lovell; Pastor, 1999). Esta foi a escolha de Gomes et al. (2023), por exemplo, para agregar as dimensões de desempenho (econômica, social e ambiental) de fazendas pantaneiras.

Outras possibilidades na construção de índices compostos com modelos baseados em DEA avançados são as propostas de Despotis (2005), Zhou et al. (2007), Hatefi e Torabi (2010), Cherchye et al. (2011), Shen et al. (2014), Wang (2015), Zanella et al. (2015), Tsaples et al. (2022), Su et al. (2023), entre outros.

Zhou et al. (2018, 2021) fizeram uma revisão da literatura sobre o uso de modelos DEA na temática da sustentabilidade. Os autores encontraram quatro agrupamentos de temas: sustentabilidade corporativa, sustentabilidade regional, construção de indicadores de sustentabilidade e análise de desempenho de sustentabilidade. Como exemplos de trabalhos que usam modelos DEA para calcular indicadores e índices de sustentabilidade em agricultura, podem ser citados: Reig-Martínez et al. (2011), Van Lemmen-Gerdessen e Pascucci, (2013), Yang et al. (2022)¹⁵.

Em DEA, a normalização usual de dados é a normalização pelo máximo, dada a propriedade de invariância à escala desses modelos e a implicação para a interpretação dos pesos (Cooper et al., 2007). Normalizações que gerem indicadores negativos podem inviabilizar o

⁽¹⁵⁾ Em estudos no contexto da sustentabilidade da agropecuária, nos quais modelos DEA são usados para calcular um escore de eficiência, o conceito usado é o de ecoeficiência, o qual é aderente ao paradigma da produção com menor consumo de recursos e menor geração de resíduos poluentes. Nesse sentido, são igualmente relevantes os enfoques que combinam DEA e análise de ciclo de vida (*life cycle assessment*) e pegada de carbono (*carbon footprint*). Ver Rebolledo-Leiva et al. (2019), Vázquez-Ibarra et al. (2020), Yang et al. (2022), Gomes e Angulo-Meza (2024), entre outros.

uso de modelos DEA, dada a impossibilidade de translação de eixos em algumas condições (Ali; Seiford, 1990). Transformações em *ranks* eliminam potenciais questões de escala e são robustas às análises DEA (Souza et al., 2023, 2022).

Por fim, cabe mencionar que Bouyssou (1999) e Belton e Stewart (1999) trazem reflexões sobre aspectos que devem ser considerados quando do uso de DEA como ferramenta multicritério. Outro registro relevante nesse contexto é a integração entre programação linear multiobjetivo e modelos DEA para incorporar informações sobre preferências dos decisores, por meio do enfoque de análise de eficiência de valor (*Value Efficiency Analysis*), conforme Korhonen et al. (2002). Esse foi o enfoque usado por Gomes e Lins (2002) na definição de um índice composto de qualidade de vida municipal.

Pesos derivados de modelos de regressão linear múltipla

Modelos de regressão linear podem revelar as associações entre um grande número de indicadores e uma medida que represente o resultado a ser alcançado (variável resposta). A hipótese de base é que há uma associação linear entre indicadores e variável resposta, o que exige independência entre os indicadores. Se forem correlacionados, o modelo pode não ser válido.

Segundo Nardo et al. (2005), se há uma variável resposta definida, então não haveria necessidade de desenvolver um índice composto. No entanto, os autores argumentam que o ajuste desse modelo ainda pode ser útil para estimar pesos (representados pelos coeficientes da regressão) ou para interpretar os subindicadores como possíveis ações políticas e quantificar o efeito relativo de cada ação política sobre a variável resposta (similar a elasticidades).

Pesos derivados de modelos multicritério

Métodos multicritério modelam em essência as relações de preferência dos decisores sobre o conjunto de alternativas possíveis (relações binárias de indiferença, preferência estrita, preferência fraca e incomparabilidade) e expressam a estrutura de preferência sobre

esse conjunto (sob a forma de uma pré-ordem completa, pré-ordem parcial e pseudo-ordem) (Gomes et al., 2004). É, assim, necessário construir um modelo que represente as preferências e os julgamentos de valor do decisor. Nesse modelo, as preferências são dadas em relação a cada critério (indicador ou dimensão; intracritério), e a regra de agregação permite comparações intercritérios, de modo a combinar preferências entre eles.

Para Barba-Romero e Pomerol (1997), um critério é construído quando o decisor define uma pré-ordem de preferências relativas a um atributo. Critérios são, assim, os elementos que permitem a comparação das ações em relação a pontos de vista particulares (Roy; Bouyssou, 1993). Ou, conforme Bouyssou (1990), critério é uma função de valor real no conjunto das alternativas, que permite que duas alternativas sejam comparadas com base em um particular ponto de vista. É a expressão qualitativa ou quantitativa de um ponto de vista empregado na avaliação das alternativas (Soares de Mello et al., 2003). A partir do conjunto de alternativas (observações), do conjunto de critérios (indicadores) e de sua matriz de decisão, Roy e Bouyssou (1993) definem quatro problemáticas de apoio à decisão, em referência ao objetivo do decisor sobre as alternativas: problemática P δ (descrição das alternativas ou cognição), problemática P α (seleção ou escolha de alternativas), problemática P γ (ordenação das alternativas), problemática P β (alocação das alternativas em classes).

A definição de pesos em métodos multicritério pode ser feita por uma ampla gama de métodos, com destaque aos métodos de soma ponderada, amplamente usados no cálculo de índices compostos. Entretanto, conforme enfatizam Bouyssou et al. (2000), os pesos usados em métodos de soma ponderada são taxas de substituição ou de compensação (*trade-offs*). Significam que para compensar uma desvantagem de x unidades no critério j , é necessária uma vantagem de y unidades no critério k . Ainda, conforme alertam Belton e Stewart (2003), pesos são constantes de escala e são, assim, dependentes da escala de medida dos critérios. Bouyssou et al. (2000) discutem as hipóteses que regem o método de soma ponderada e algumas dificuldades no seu correto uso: independência em relação às preferências (não tem relação com

correlação do ponto de vista estatístico), interação entre critérios, arbitrariedade na codificação de critérios qualitativos, imprecisão nas medidas e na determinação de *trade-offs*, incerteza na avaliação (que pode ser de natureza estocástica), questões de reversão de ordem.

O correto tratamento de uma medida que reflita importância relativa é crítico na implementação de modelos de decisão multicritério. Belton e Stewart (2003) afirmam que avaliar e interpretar pesos como medidas de importância tem sido bastante controverso na literatura multicritério. De fato, pesos têm interpretação dependente do modelo de preferências usado, e expressar importância relativa entre critérios pode não ser trivial para o decisor (por ex., expressar importância relativa entre custo e segurança). Cabe ainda observar que pesos em modelos de programação por metas (*goal programming*), em métodos de sobreclassificação (*outranking*) ou em conjuntos difusos (*fuzzy sets*) têm interpretações distintas.

Dentre os métodos multicritério que fazem uso de soma ponderada na definição de índices compostos (calculam um critério único de síntese), o *Analytic Hierarchy Process* – AHP (Saaty, 1987) parece ser um dos mais usados (Podgórski, 2015; Veisi et al., 2016; Sajadian et al., 2017; Aguilar-Rivera, 2019; Rao et al., 2019; Lin, 2020; Tzouramani et al., 2020; Silvestri et al., 2022; Suresh et al., 2022). Yu e Mu (2022) e Gómez-Limón et al. (2020) afirmam que isso se deve à sua relativa simplicidade e facilidade de uso. A popularidade do AHP pode ser atribuída ao apelo da escala semântica usada, que permite ao decisor comparar alternativas por meio de julgamentos qualitativos. No entanto, conforme Belton e Stewart (2003); Bana e Costa e Vansnick (2008), os atributos de sucesso são também razões para cautela no uso, em especial no que concerne à interpretação dos pesos dos critérios, à interpretação numérica da escala semântica, ao método de estimação de autovetores, além da questão bastante discutida de reversão de ordem.

Analytic Hierarchy Process (AHP)

A breve descrição que segue toma por base Nardo et al. (2005), European Union/OECD/EC-JRC (2008) e Gómez-Limón et al. (2020).

O AHP permite que o tomador de decisão derive pesos a partir de uma escala semântica, ao invés de atribuí-los arbitrariamente. A característica compensatória do método implica que cada peso obtido é um *trade-off*, ou seja, indica o quanto o decisor está disposto a substituir uma determinada variável por outra. Portanto, os pesos obtidos com o AHP não são coeficientes de importância de cada indicador individual na explicação ou formação do índice composto.

A base do AHP é uma comparação ordinal pareada que é expressa por declarações de preferência. A “força” da preferência é expressa em uma escala semântica de preferências de 1 a 9 (1, 3, 5, 7, 9, onde 1 representa igual preferência e 9 preferência extrema; valores intermediários são permitidos). Dessas comparações resulta uma matriz quadrada de comparações, recíproca e positiva, na qual os elementos da diagonal principal são unitários ($A_{ij}=1$) e $A_{ji}=1/A_{ij}$.

A implementação do método envolve as seguintes etapas: (1) estruturação do problema de ponderação com base em uma hierarquia ou árvore, na qual o objetivo geral do problema está no topo da hierarquia (ex., obter um índice composto de sustentabilidade), os critérios de decisão (ex., dimensões de sustentabilidade) que contribuem para o objetivo geral estão no nível intermediário e os subcritérios (ex., indicadores) estão posicionados nos níveis mais baixos; (2) decisores ou especialistas fazem comparações pareadas em cada nó da árvore e expressam suas preferências sobre quanto um (sub)critério deveria ser valorado em relação ao outro, seguindo a escala fundamental de Saaty (de 1 a 9); (3) cálculo dos pesos locais de critérios e subcritérios por meio do método de autovetores proposto por Saaty (1987); (4) cálculo dos pesos globais.

Observe-se que o AHP permite algum grau de inconsistência nos julgamentos dos decisores, a qual é medida por uma razão de inconsistência que não deve ultrapassar certo valor predefinido. Há métodos, no entanto, que conseguem identificar e corrigir as inconsistências dos decisores, como é o caso do método MACBETH (Bana e Costa e Vansnick, 1994, 1997). Assim como o AHP, o MACBETH faz uso de uma escala semântica de juízo de valor (atratividade entre pares de elementos) para obter uma escala cardinal de valores (pesos para critérios e notas para alternativas).¹⁶

Outros métodos de ponderação

European Union/OECD/EC-JRC (2008) e Nardo et al. (2005) citam ainda outros métodos de ponderação usados para a construção de índices compostos, como alocação de orçamento (*budget allocation*); método baseado em opinião pública; análise conjunta e disposição a pagar (*willingness to pay*); modelo de componentes não observados.

No contexto de indicadores e índices compostos de sustentabilidade, são ainda encontrados na literatura trabalhos que fazem uso de outras abordagens, como: programação por metas (Xavier et al., 2018); métricas de distância, distância euclidiana, método TOPSIS (Yang; Mei, 2017; Fu et al., 2020; Correa Machado et al., 2022); entropia (Sabaghi et al., 2016; Li et al., 2019; Karagiannis; Karagiannis, 2020; Zhao et al., 2022); lógica *fuzzy* (Sabaghi et al., 2016; Santos et al., 2017; Lin, 2020; Reis et al., 2023); aprendizado de máquina (Tsaples et al., 2022); entre outros.

⁽¹⁶⁾ O método MACBETH foi usado durante a iniciativa *Rio Climate Challenge* (evento paralelo à conferência Rio+20) como ferramenta multicritério de apoio a especialistas quanto à seleção de medidas de mitigação para atender aos limites estabelecidos pelo IPCC (concentração de gases de efeito estufa e aquecimento médio do planeta (Bana e Costa et al., 2013).

Métodos de agregação

A etapa de agregação refere-se à integração dos componentes que foram ponderados na construção de um único índice composto. Segundo Gan et al. (2017), métodos de agregação podem ser classificados quanto à semântica da agregação e ao grau de permissão de compensação, este sendo mais usado na integração de indicadores ponderados baseados em conceitos de sustentabilidade. Este também é o entendimento de European Union/OECD/EC-JRC (2008) e Nardo et al. (2005), que categorizam os métodos de agregação em métodos de agregação aditiva, métodos de agregação multiplicativa ou geométrica e métodos de agregação não compensatórios.

Sobre a escolha entre as agregações aditiva e multiplicativa é importante mencionar que a agregação aditiva é uma função linear e está implícito que o decisor está disposto a trocar unidades de um atributo por unidades de outro atributo a uma determinada taxa de substituição fixa, até o ponto em que se tenha zero do primeiro atributo. Está também considerado que a taxa de substituição será a mesma, independentemente dos níveis dos atributos. Se essas hipóteses não forem válidas, então a função aditiva não é adequada ao caso em questão.

Agregação aditiva

O método de agregação aditiva mais simples considera que as observações são ordenadas em cada indicador e os *ranks* são calculados. Os *ranks* de cada observação em cada indicador são somados. Este é um método que considera apenas as ordenações (método ordinal) e é chamado método de Borda (Barba-Romero; Pomerol, 1997; Bouyssou et al., 2000; Gomes et al., 2013). Tem como vantagem a simplicidade e a não influência de atipicidades. Como desvantagem está a perda de informação sobre valores absolutos.

Outro método de agregação aditivo é o que se baseia no número de indicadores que estão acima e abaixo de alguma referência (*benchmark*). Esse método usa pontuações nominais para cada indicador para calcular a diferença entre o número de indicadores que estão

acima e abaixo de um limite definido arbitrariamente em torno da média. Tem como vantagem a simplicidade e a não influência de atipicidades. A desvantagem é a perda de informação sobre intervalos.

A soma ponderada é o método de agregação aditiva mais usado. Nesta abordagem, a partir dos valores de cada observação em cada indicador e dos pesos dos indicadores, para cada observação o índice síntese é dado pela multiplicação entre o valor de cada indicador e seu peso e posterior soma desses valores. As hipóteses em que o modelo se baseia devem ser consideradas, de modo a não invalidar os resultados.

European Union/OECD/EC-JRC (2008) e Nardo et al. (2005) destacam que este método é dependente da qualidade dos indicadores individuais, de suas unidades de medida e tem implicações para a interpretação dos pesos: pesos em modelos de agregação aditiva são, necessariamente, taxas de substituição e não indicam importância do indicador associado. Ainda, o método tem caráter compensatório.

Agregação geométrica

Para o cálculo da agregação por média geométrica, com base nas observações, nos valores de cada observação em cada indicador e nos pesos dos indicadores, para cada observação o índice síntese é dado pela potenciação de cada indicador pelo seu peso e posterior multiplicação desses valores.

Médias geométricas ponderadas são bastante usadas para cálculo de números índice (ex., Índice de Fisher, Índice de Törnqvist), base da construção de medidas de produtividade total dos fatores, por exemplo. Sugere-se Coelli et al. (2005) para detalhes sobre números índice.

Agregação não compensatória

Como já mencionado, pesos são interpretados como *trade-offs* em modelos de agregação aditiva e não como importância relativa. Para que os pesos tenham interpretação de grau de importância, ou

seja, maior peso é atribuído ao elemento de maior relevância, são indicados métodos não compensatórios.

Na classe de métodos não compensatórios estão, por exemplo, os métodos de sobreclassificação (*outranking*), como os das famílias PROMETHEE (Behzadian et al., 2010) e ELECTRE (Govindan; Jepsen, 2016). Nos métodos de sobreclassificação, em geral não é realizada uma agregação para definir um escore de síntese para cada alternativa (como nos métodos compensatórios ou de agregação por meio de critério único de síntese). Nesses métodos, a avaliação intercritério pode ser representada por pesos que assumem a noção de grau de importância, visto que não há uma transformação de escalas de avaliações intercritério para uma escala de avaliação global.

Maiores detalhes sobre soma ponderada, métodos compensatórios e não compensatórios, no que tange à geração de índices compostos (em cenário multicritério), podem ser vistos em Bana e Costa (1990), Podinovskii (1994), Barba-Romero e Pomerol (1997), Bouys-sou et al. (2000, 2011), Belton e Stewart (2003), Munda (2004, 2012), Greco et al. (2019), entre outros.

Modelo Conceitual para estimativa de um índice de sustentabilidade – proposta do projeto Módulo IS_Agro

O projeto Módulo IS_Agro^{17,18} foi proposto pelo Mapa e é executado por meio de um TED pactuado entre Mapa e Embrapa¹⁹, pela Embrapa Solos, Embrapa Agrobiologia, Embrapa Meio Ambiente e a Assessoria Internacional (ARIN/SGIRI), com a colaboração do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) e outras instituições parceiras. O propósito do projeto é identificar desafios no desenvolvimento e aprimoramento de métricas e indicadores, que afetam a interpretação do desempenho agroambiental nacional. Objetiva ser uma fonte de informações, indicadores e índices agro-socioambientais para suporte às iniciativas de monitoramento da sustentabilidade da agricultura brasileira.

O Módulo IS_Agro (Embrapa Solos, 2023) é um ambiente digital para cruzamento e análise de indicadores agro-socioambientais e de sustentabilidade, envolvendo a obtenção e a organização de dados multifontes, cálculo automático e disponibilização de índices e de

(17) Projeto SEG (Sistema Embrapa de Gestão) - Módulo IS_Agro - Soluções digitais para criação, estimativa e divulgação de indicadores agro-socioambientais - Inteligência Estratégica para a Sustentabilidade da Agropecuária Nacional. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/220069/modulo-is_agro---solucoes-digitais-para-criacao-estimativa-e-divulgacao-de-indicadores-agro-socioambientais---inteligencia-estrategica-para-a-sustentabilidade-da-agropecuaria-nacional.

(18) IS_Agro - Indicadores Agro-socioambientais - A performance agroambiental entra definitivamente na agenda da Agricultura Global. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/isagro/>.

(19) Termo de Execução Descentralizada (TED nº 450/2021, 23/12/2021, Doc. SEI 6451607).

indicadores para avaliar a sustentabilidade da agricultura brasileira, o que possibilitará o acompanhamento de indicadores de sustentabilidade agroambientais selecionados. Nesse ambiente digital, acessível e simplificado, os indicadores agro-socioambientais são apresentados em painéis (*dashboards*).

Os indicadores agroambientais do Módulo IS_Agro estão fundamentados naqueles propostos e recomendados pela OECD (European Union, 2022a). O projeto tem previsão adicional de prover modelos conceituais sobre indicadores de caráter socioeconômico e um índice de sustentabilidade empresarial do agronegócio (ISEAgro). No caso dos indicadores agro-socioambientais, cabe salientar o esforço para que as estimativas sejam feitas de maneira adequada e adaptada ao contexto nacional. Quando possível, é preservada a metodologia de cálculo preconizada pelas instâncias internacionais, como a OECD. Os indicadores agroambientais componentes do IS_Agro são: risco de erosão hídrica e eólica; balanço de nitrogênio e fósforo; área agropecuária; área de agricultura orgânica; emissões de gás amônia; emissão de gases de efeito estufa; qualidade da água (nitrato, fosfato, pesticidas); e, comercialização de pesticidas.

Caso haja interesse na definição de um índice síntese que agregue tais indicadores, entende-se que é necessário percorrer etapas complementares ao cálculo desses indicadores parciais. Nesse contexto e dada a revisão da literatura sobre indicadores de sustentabilidade e aspectos teóricos e práticos concernentes à proposição de indicadores e de índices compostos, mencionam-se a seguir etapas que potencialmente devem ser avaliadas para a obtenção desses índices compostos de sustentabilidade.

Dimensão agroambiental

A dimensão agroambiental está detalhada no projeto SEG Módulo IS_Agro, no qual estão descritas atividades a partir das quais podem ser identificados os temas que irão gerar indicadores de sustentabilidade para esta dimensão. Não estão identificados, porém, os

procedimentos que darão suporte à geração do índice composto da dimensão agroambiental. Neste sentido, dado que os indicadores da dimensão estão definidos e podem ser calculados em escala apropriada, sugere-se:

A) Avaliar a pertinência da proposição de dimensões parciais da dimensão agroambiental

A estruturação do problema via arranjo hierárquico possibilita maior entendimento sobre o que se pretende medir na dimensão. Facilita, ainda, a emissão de julgamentos de valor por parte de decisores, caso sejam necessários na etapa de ponderação. Como parte dos métodos de ponderação exige comparações pareadas, o aumento da dimensionalidade da matriz de comparações pode implicar julgamentos inconsistentes. Dimensões menores minimizam este tipo de situação.

Com base no texto do projeto SEG Módulo IS_Agro, os indicadores poderiam ser agrupados em dimensões parciais, conforme segue:

- Solo: Risco de erosão hídrica e eólica; Balanço de nitrogênio e fósforo; Área de agricultura orgânica.
- Ar: Emissões de amônia; Gases de efeito estufa.
- Água: Qualidade da água (poluição por nitrato, fosfato, pesticidas).
- Insumos: Comercialização de pesticidas.

Nesse contexto, a estrutura hierárquica (ou em árvore) proposta é a apresentada como exemplo na Figura 1. Tal estrutura pode ser apropriada por quaisquer dos métodos mencionados no item “Métodos de ponderação e de agregação”, facilitando o entendimento do problema, sua estruturação e a elicitação de julgamentos de valor pelos decisores (se for o caso).

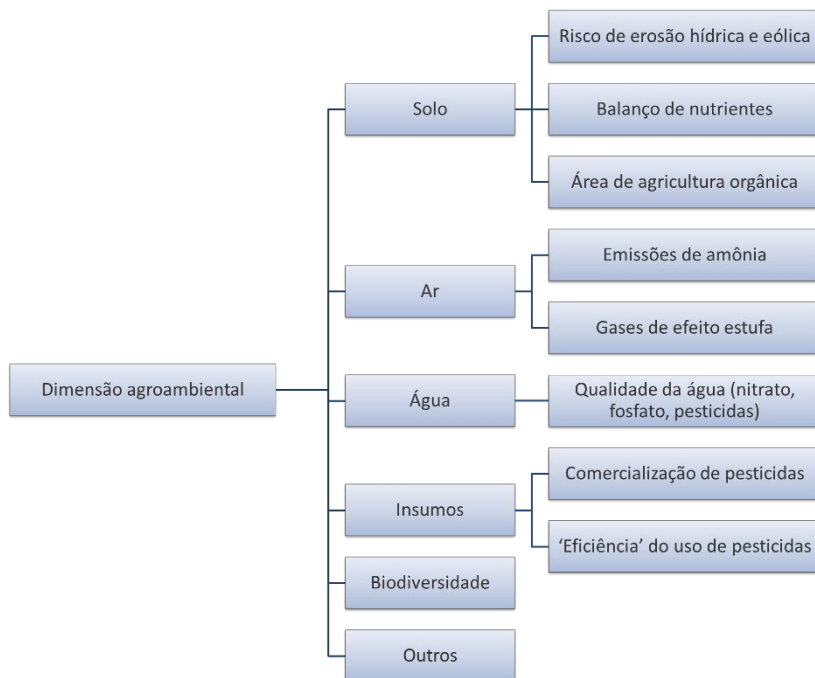


Figura 1. Estrutura hierárquica proposta para a dimensão agroambiental do projeto Módulo IS_Agro.

B) Construção do índice composto da dimensão agroambiental

Conforme discussão da literatura, sugere-se seguir o arcabouço metodológico aqui revisto e apresentado, no que se refere às etapas para construção do índice composto da dimensão agroambiental.

A partir dos indicadores definidos, as etapas potenciais são:

- Normalização dos dados: sugere-se normalização por intervalo.
- Ponderação e agregação dos indicadores para construção dos índices compostos das subdimensões, se cabível: sugere-se,

em princípio, a abordagem de média ponderada equilibrada ou balanceada, conforme Hahn et al. (2009) e Sullivan et al. (2002), na qual cada subcomponente contribui igualmente para a construção do índice (pesos iguais). Tal esquema de pesos pode ser ajustado oportunamente.

- Ponderação e agregação das subdimensões para construção do índice composto da dimensão agroambiental: sugere-se, em princípio, a abordagem de média ponderada equilibrada ou balanceada. Esta estrutura de pesos pode ser alterada oportunamente.
- Análises de robustez e sensibilidade.
- Apresentação e visualização.

Dimensão socioeconômica

Do projeto SEG Módulo IS_Agro infere-se a relevância dos aspectos socioeconômicos para a definição de um índice composto de sustentabilidade da agropecuária brasileira. Neste sentido, o modelo conceitual de caracterização e obtenção da dimensão socioeconômica poderia, potencialmente, considerar:

- Definição do que se entende por sustentabilidade socioeconômica da agropecuária e suas dimensões.
- Revisão bibliográfica com foco em levantamento e compilação de indicadores concernentes a aspectos socioeconômicos da sustentabilidade na agropecuária, considerando a definição anterior.
- Definição e caracterização de subdimensões da dimensão socioeconômica (ex., aspectos econômico-financeiros; aspectos sociais - trabalho, acesso a saúde e educação; acesso a crédito para produção; infraestrutura etc.), se for o caso.

- Seleção e cálculo de indicadores aderentes aos objetivos da dimensão para o IS_Agro (por subdimensão). Elencar as variáveis que são necessárias ao cálculo dos indicadores selecionados, as fontes de dados (mensurabilidade, disponibilidade, acesso, risco de descontinuidade) e a escala geográfica de medida (todos os indicadores devem estar medidos na mesma escala geográfica para que possam ser agregados).
- Normalização dos indicadores: sugere-se normalização por intervalo.
- Avaliação da adequação do conjunto de indicadores.
- Ponderação e agregação dos indicadores para construção dos índices compostos das subdimensões: sugere-se, em princípio, a abordagem de média ponderada equilibrada ou balanceada, conforme Hahn et al. (2009) e Sullivan et al. (2002), na qual cada subcomponente contribui igualmente para a construção do índice (pesos iguais). Tal esquema de pesos pode ser ajustado oportunamente.
- Ponderação e agregação das subdimensões para construção do índice composto da dimensão socioeconômica: sugere-se, em princípio, a abordagem de média ponderada equilibrada ou balanceada. Esta estrutura de pesos pode ser alterada oportunamente.
- Análises de robustez e sensibilidade.
- Apresentação e visualização.

Índice composto de sustentabilidade agro-socioambiental (ISAgro)

A partir dos índices compostos das dimensões agroambiental e socioeconômica é possível constituir o índice composto de sustentabilidade agro-socioambiental (ISAgro) da agricultura, conforme

exemplo da Figura 2. Para tal, as etapas potenciais de um modelo conceitual poderiam ser:

- Ponderação e agregação dos índices compostos das dimensões agroambiental e socioeconômica: sugere-se, em princípio, a abordagem de média ponderada equilibrada ou balanceada. Tal ponderação pode ser ajustada oportunamente.
- Análises de robustez e sensibilidade.
- Apresentação e visualização.

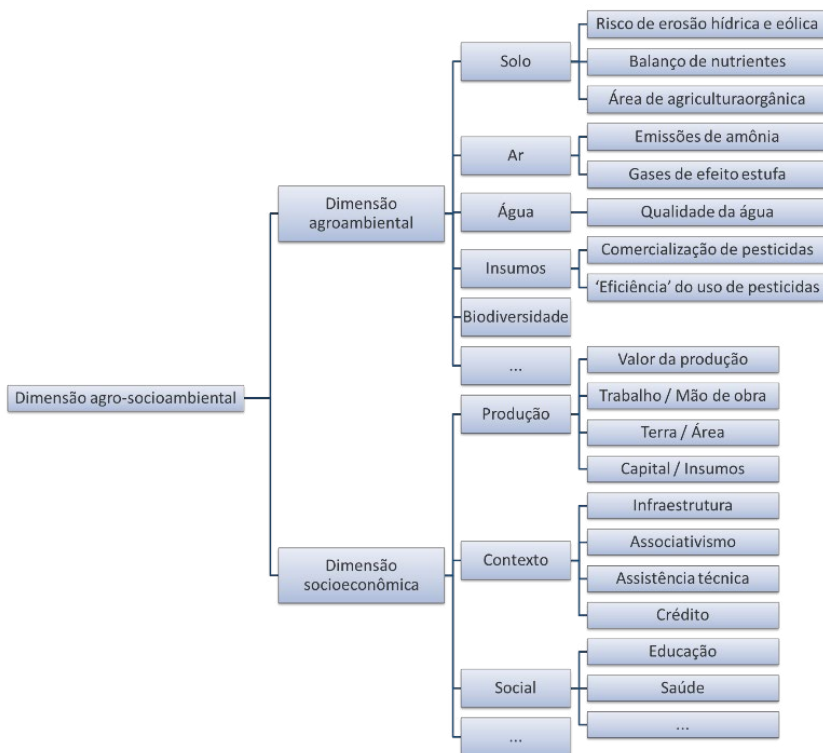


Figura 2. Exemplo de proposta conceitual do índice de sustentabilidade agro-socioambiental (ISAgro) do projeto Módulo IS_Agro.

Índice de sustentabilidade empresarial do agronegócio (ISEAgro)

A proposição de um modelo conceitual para a construção de um índice composto de sustentabilidade empresarial do agronegócio (ISEAgro) poderia, potencialmente, considerar:

- Definição do conceito de empresa e do que se entende por sustentabilidade empresarial do agronegócio brasileiro.
- Revisão bibliográfica com foco em levantamento e compilação de indicadores concernentes a aspectos de sustentabilidade empresarial, considerando a definição do que seja “empresa” (unidade de observação) para o projeto em questão.
- Definição e caracterização de dimensões e subdimensões da sustentabilidade empresarial, se for o caso.
- Seleção e cálculo de indicadores aderentes aos objetivos da dimensão para o ISEAgro (por subdimensão). Elencar as variáveis necessárias ao cálculo dos indicadores selecionados, as fontes de dados (mensurabilidade, disponibilidade, acesso, risco de descontinuidade) e a unidade observacional de medida (todos os indicadores devem estar medidos na mesma escala para que possam ser agregados).
- Normalização dos indicadores: sugere-se normalização por intervalo.
- Avaliação da adequação do conjunto de indicadores.
- Ponderação e agregação dos indicadores para construção dos índices compostos das subdimensões: sugere-se, em princípio, a abordagem de média ponderada equilibrada ou balanceada. Tal ponderação pode ser ajustada oportunamente.
- Ponderação e agregação das dimensões para construção do índice composto de sustentabilidade empresarial: sugere-se, em princípio, a abordagem de média ponderada equilibrada ou balanceada. Tal ponderação pode ser ajustada oportunamente.
- Análises de robustez e sensibilidade.
- Apresentação e visualização.

Considerações finais

Neste documento, são apresentados os resultados de buscas e de revisão bibliográficas sobre a temática de sustentabilidade em geral e na agropecuária. As experiências encontradas são diversas e, usualmente, os indicadores propostos são específicos ao estudo realizado. É importante salientar que a revisão bibliográfica realizada não foi exaustiva e usou o termo “sustentabilidade” como palavra-chave principal. É possível, contudo, que termos como “desempenho”, “impacto” e “eficiência” possam ser usados na literatura como sinônimos de medidas de sustentabilidade.

Foram aqui também resumidos os aspectos teóricos e práticos a considerar quando da proposição de indicadores e de índices compostos, além de um guia para esta construção. A depender dos métodos escolhidos, em especial para as etapas de ponderação e de agregação, entende-se que poderão ser necessários aprofundamentos teóricos e intensa interação com decisores e especialistas para a elicitación e incorporação de julgamento de valor aos modelos.

Ademais, desenvolveu-se uma proposta de modelo conceitual a ser apresentada ao Mapa como entrega do projeto Módulo IS_Agro. Tal proposta toma por base: as etapas de construção de índices compostos detalhadas neste documento, a definição do conceito de sustentabilidade que se pretende abordar e a apresentação e a visualização de indicadores e índice.

Ressalta-se a importância da definição do que se entende por sustentabilidade. Esta definição norteia: buscas bibliográficas mais precisas, seleção dos indicadores adequados e impacto no escore síntese que seja eventualmente calculado. Igualmente relevante é definir a unidade de observação ou a escala geográfica de análise e as fontes das variáveis que irão compor os indicadores, visto que estes itens podem inviabilizar alguns dos cálculos.

Os indicadores de sustentabilidade desenvolvidos no projeto Módulo IS_Agro podem servir, ainda, de subsídio a programas de certificação,

de modo a garantir o alcance dos objetivos amplos de sustentabilidade em sistemas agrícolas (Oya et al., 2017; Verma et al., 2022).

Referências

ABREU, U. G. P.; LIMA, H. P.; SANTOS, S. A.; MASSRUHÁ, S. M. F. **Protocolo: Índice Financeiro (IF) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS)**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2015. 13 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 134). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1036669/1/DOC134.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2022.

AGUILAR-RIVERA, N. A framework for the analysis of socioeconomic and geographic sugarcane agroindustry sustainability. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 66, p. 149-160, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.07.006>.

AIT SIDHOUM, A.; DAKPO, K. H.; LATRUFFE, L. Trade-offs between economic, environmental and social sustainability on farms using a latent class frontier efficiency model: Evidence for Spanish crop farms. **PLoS One**, v. 17, n. 1, e0261190, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261190>.

AIT SIDHOUM, A.; SERRA, T.; LATRUFFE, L. Measuring sustainability efficiency at farm level: a data envelopment analysis approach. **European Review of Agricultural Economics**, v. 47, n. 1, p. 200-225, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093/erae/jbz015>.

ALAOUI, A.; BARÃO, L.; FERREIRA, C. S. S.; HESSEL, R. An overview of sustainability assessment frameworks in agriculture. **Land**, v. 11, n. 4, p. 537, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11040537>.

ALI, A.; PERNA, S. Sustainability indicators in agriculture: a review and bibliometric analysis using Scopus database. **Journal of Agriculture and Environment for International Development**, v. 115, n. 2, p. 5-21, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.36253/jaeid-12083>.

ALI, A. I.; SEIFORD, L. M. Translation invariance in data envelopment analysis. **Operations Research Letters**, v. 9, n. 6, p. 403-405, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-6377\(90\)90061-9](https://doi.org/10.1016/0167-6377(90)90061-9).

ALLEN, R.; ATHANASSOPOULOS, A.; DYSON, R. G.; THANASSOULIS, E. Weights restrictions and value judgements in Data Envelopment Analysis: evolution, development and future directions. **Annals of Operations Research**, v. 73, p. 13-34, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1018968909638>.

ALMEIDA, A. T.; MORAIS, D. C.; COSTA, A. P. C. S.; ALENCAR, L. H.; DAHER, S. F. D. **Decisão em grupo e negociação; métodos e aplicações**. 2. ed. [Rio de Janeiro]: Interciência, 2019. 272 p.

AMÂNCIO, C. O. da G.; ARAUJO, M. T. B. de; SANTOS, S. A.; NARCISO, M. G.; OLIVEIRA, M. D. de. **Protocolo: Índice de Bem-Estar Social (IBS) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS)**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2016. 16 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 139). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1054996>. Acesso em: 19 ago. 2025.

ANDREU PINILLOS, A.; FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, J. L.; FERNÁNDEZ MATEO, J. Revisión crítica de la dimensión Gobierno Corporativo en los cuestionarios de los Índices de Sostenibilidad. **Revista de Comunicación**, v. 17, n. 2, p. 9-40, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.26441/RC17.2-2018-A1>.

ARAGÃO, J. L.; PFEIFER, L. F. M.; BORRERO, M. A. V.; SILVA, S. A. S. Global Sustainability Index (GSI) construction: an evaluation tool for public policies directed at sustainable milk production in contemporary time. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, e79111032496, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32496>.

ARCESE, G.; FORTUNA, F.; PASCA, M. G. The sustainability assessments of the supply chain of agrifood products: the integration of socio-economic metrics. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 40, 100782, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100782>.

AREAL, F. J.; JONES, P. J.; MORTIMER, S. R.; WILSON, P. Measuring sustainable intensification: combining composite indicators and efficiency

analysis to account for positive externalities in cereal production. **Land Use Policy**, v. 75, p. 314-326, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.001>.

ARRU, B.; CISILINO, F.; SAL, P.; FURESI, R.; PULINA, P.; MADAU, F. A. The economic and environmental sustainability dimensions of agriculture: a trade-off analysis of Italian farms. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, 1474903, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1474903>.

BANA E COSTA, C. A.; ANGULO MEZA, L.; OLIVEIRA, M. D. O método MACBETH e aplicação no Brasil. **Engevista**, v. 15, n. 1, p. 3-27, 2013. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v15i1.484>.

BANA E COSTA, C. A. (ed.). **Readings in multiple criteria decision aid**. Lisbon: Springer-Verlag, 1990. 661 p.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J.-C. A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n. 3, p. 1422-1428, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.022>.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J.-C. A theoretical framework for Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH). In: CLÍMACO, J. C. N. (ed.). **Multicriteria analysis: proceedings of the XIth International Conference on MCDM**, 1-6 August 1994, Coimbra, Portugal. [Coimbra]: Springer-Verlag, 1997. p. 15-24.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J.-C. MACBETH: an interactive path towards the construction of cardinal value functions. **International Transactions in Operational Research**, v. 1, n. 4, p. 489-500, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0969-6016\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0969-6016(94)90010-8).

BARBA-ROMERO, S.; POMEROL, J. C. **Decisiones multicritério: fundamentos teóricos y utilización práctica**. UAH: Universidad de Alcalá, 1997. 420 p.

BARNES, A. P.; THOMSON, S. G. Measuring progress towards sustainable intensification: how far can secondary data go? **Ecological Indicators**, v. 36, p. 213-220, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.07.001>.

BATHAEI, A.; ŠTREIMIKIENE, D. A systematic review of agricultural sustainability indicators. **Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 241, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020241>.

BECKER, W.; SAISANA, M.; PARUOLO, P.; VANDECASTEELE, I. Weights and importance in composite indicators: closing the gap. **Ecological Indicators**, v. 80, p. 12-22, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.056>.

BEHZADIAN, M.; KAZEMZADEH, R. B.; ALBADVI, A.; AGHDASI, M. PROMETHEE: a comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 1, p. 198-215, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>.

BELTON, V.; STEWART, T. J. DEA and MCDA: competing or complementary approaches? In: MESKENS, N.; ROUBENS, M. (ed.). **Advances in decision analysis**. Mons; Liege: Springer, 1999. v. 4, p. 87-104. (Springer. Mathematical Modelling: theory and applications, 4). DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-0647-6_6.

BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2003. 372 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>.

BI, A. Z.; UMESH, K. B.; MD ABDUL, B.; SIVAKUMA, D.; SRIKANTH, P. Economic and environmental sustainability of agriculture production at the crop level. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v. 10, n. 3, p. 1433-1456, 2024. DOI: <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.03.29>.

BINDER, C. R.; FEOLA, G.; STEINBERGER, J. K. Considering the normative, systemic and procedural dimensions in indicator-based sustainability assessments in agriculture. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 30, n. 2, p. 71-81, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.06.002>.

BOCKSTALLER, C.; GUICHARD, L.; KEICHINGER, O.; GIRARDIN, P.; GALAN, M. B.; GAILLARD, G. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems: a review. **Agronomy for Sustainable**

Development, v. 29, p. 223-235, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro:2008058>.

BOLFE, E. L. Application of geotechnologies in the development of sustainable agriculture in Brazil. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 12, p. 458-463, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.612.53>.

BOUYSSOU, D. Building criteria: a prerequisite for MCDA. In: BANA E COSTA, C. A. (ed.). **Readings in multiple criteria decision aid**. Lisbon: Springer-Verlag, 1990. p. 58-80. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-75935-2_4.

BOUYSSOU, D.; MARCHANT, T.; PIRLOT, M.; PERNY, P.; TSOUKIAS, A.; VINCKE, P. **Evaluation and decision models: a critical perspective**. New York: Springer, 2000. 462 p. (International series in operations research and management Science, v. 32). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1593-7>.

BOUYSSOU, D.; MARCHANT, T.; PIRLOT, M.; TSOUKIAS, A.; VINCKE, P. **Evaluation and decision models with multiple criteria: stepping stones for the analyst**. [New York]: Springer, 2011. 445 p. (International series in operations research and management science, v. 86).

BOUYSSOU, D. Using DEA as a tool for MCDM: some remarks. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, n. 9, p. 974-978, 1999. DOI: <https://doi.org/10.2307/3010194>.

BROUWER, F.; CRABTREE, B. **Environmental indicators and agricultural policy**. [Oxfordshire]: CABI, 1998. 304 p.

BUREAU, J.-C.; ANTÓN, J. Agricultural total factor productivity and the environment: a guide to emerging best practices in measurement. **OECD Food, Agriculture and Fisheries Paper**, n. 177, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1787/6fe2f9e0-en>.

CALLADO, A. L. C. **Modelo de mensuração de sustentabilidade empresarial: uma aplicação em vinícolas localizadas na Serra Gaúcha**. 2010. 216 f. Tese (Doutorado em Agronegócios) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CAPORALETTI, L. E.; DULÁ, J. H.; WOMER, N. K. Performance evaluation based on multiple attributes with nonparametric frontiers. **Omega**, v. 27, n. 6, p. 637-645, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(99\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(99)00022-5).

CARVALHO, M. I.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. A roadmap for sustainability performance assessment in the context of agri-food supply chain. **Sustainable Production and Consumption**, v. 34, n. 1, p. 565-585, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.001>.

CASTILLO-DÍAZ, F. J.; BELMONTE-URENA, L. J.; LÓPEZ-SERRANO, M. J.; CAMACHO-FERRE, F. Assessment of the sustainability of the European agri-food sector in the context of the circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, v. 40, p. 398-411, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.010>.

CHERCHYE, L.; MOESEN, W.; ROGGE, N.; VAN PUYENBROECK, T. An introduction to 'Benefit of the Doubt' composite indicators. **Social Indicators Research**, v. 82, p. 111-145, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-006-9029-7>.

CHERCHYE, L.; MOESEN, W.; ROGGE, N.; VAN PUYENBROECK, T. Constructing composite indicators with imprecise data: a proposal. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 9, 10940-10949, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.136>.

CHESSON, J. Sustainable development: connecting practice with theory. **Journal of Environmental Assessment Policy and Management**, v. 15, n. 1, 1350002, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1464333213500026>.

CHOPIN, P.; MUBAYA, C. P.; DESCHEEMAER, K.; ÖBORN, I.; BERGKVIST, G. Avenues for improving farming sustainability assessment with upgraded tools, sustainability framing and indicators: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, n. 19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00674-3>.

CIRONE, F.; PETRUZZELLI, M.; DE MENNA, F.; SAMOGGIA, A.; BUSCAROLI, E.; DURANTE, E.; ORSINI, F.; RUFÍ-SALÍS, M.; TONINI, P.; DURANY, X. G.; GRAAMANS, L.; FARGUE-LELIÈVRE, A.; SAINT-GES, V.; FOX-KÄMPER, R.; SPECHT, K.; PASCUAL-FERNÁNDEZ, J. J.; VITTUARI, M. A sustainability scoring system to assess food initiatives in city regions.

Sustainable Production and Consumption, v. 36, p. 88-99, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.022>.

COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; O'DONNELL, C. J. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. 2nd ed. [New York]: Springer, 2005. 349 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/b136381>.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. Índice de Desenvolvimento Rural dos Municípios Brasileiros. [Brasília, DF], 2013. Não paginado.

COOK, W. D.; ZHU, J. **Data envelopment analysis**: modeling operational processes and measuring productivity. [Scotts Valley]: GreateSpace, 2008. 248 p.

COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. **Data Envelopment Analysis**: a comprehensive text with models, applications, references and DEA - Solver Software. 2nd ed. [New York]: Springer, 2007. 490 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-45283-8>.

CORREA MACHADO, A. M.; EKEL, P. I.; LIBÓRIO, M. P. Goal-based participatory weighting scheme: balancing objectivity and subjectivity in the construction of composite indicators. **Quality & Quantity**: International Journal of Methodology, v. 57, n. 5, p. 4387-4407, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01546-y>.

D'ANGELCOLA, M. E.; DELPRINO, M. R.; MITIDIERI, M. S.; RODRIGUES, G. S. **Sistema de Evaluación Ponderada de Impacto Ambiental - SEPIA**: una herramienta de trabajo para la gestión sostenible de los territorios. Buenos Aires: INTA, 2021. 196 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1137850>. Acesso em: 25 jun. 2022.

DE MONTIS, A.; SERRA, V.; CALIA, G.; TROGU, D.; LEDDA, A. To weight or not to weight, that is the question: the design of a composite indicator of landscape fragmentation. **Applied Sciences**, v. 11, n. 7, 3208, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11073208>.

DESIDERIO, E.; GARCÍA-HERRERO, L.; HALL, D.; SEGRÈ, A.; VITTUARI, M. Social sustainability tools and indicators for the food supply chain: a

systematic literature review. **Sustainable Production and Consumption**, v. 30, p. 527-540, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.015>.

DESPOTIS, D. K. A reassessment of the human development index via data envelopment analysis. **Journal of the Operational Research Society**, v. 56, n. 8, p. 969-980, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601927>.

DIALGA, I.; GIANG, L. T. H. Highlighting methodological limitations in the steps of composite indicators construction. **Social Indicators Research**, v. 131, n. 2, p. 441-465, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-016-1263-z>.

DIEZ-CAÑAMERO, B.; BISHARA, T.; OTEGI-OLASO, J. R.; MINGUEZ, R.; FERNÁNDEZ, J. M. Sustainability measurement of corporate social responsibility: a review of corporate sustainability indexes, rankings and ratings. **Sustainability**, v. 12, n. 5, 2153, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12052153>.

DILLON, E. J.; HENNESSY, T.; HYNES, S. Assessing the sustainability of Irish agriculture. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 8, n. 3, p. 131-147, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0044>.

DIZDAROGLU, D. The role of indicator-based sustainability assessment in policy and the decision-making process: a review and outlook. **Sustainability**, v. 9, n. 6, 1018, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9061018>.

DOYLE, J. R.; GREEN, R. Cross-evaluation in DEA: improving discrimination among DMUs. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 33, n. 3, p. 205-222, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1080/03155986.1995.11732281>.

DOYLE, J. R.; GREEN, R. Data envelopment analysis and multiple criteria decision making. **Omega**, v. 21, n. 6, p. 713-715, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(93\)90013-B](https://doi.org/10.1016/0305-0483(93)90013-B).

DOYLE, J. R.; GREEN, R. Efficiency and cross-efficiency in DEA: derivations, meanings and uses. **Journal of the Operational Research Society**, v. 45, n. 5, p. 567-578, 1994. DOI: <https://doi.org/10.2307/2584392>.

EDEN, C. Cognitive mapping. **European Journal of Operational Research**, v. 36, n. 1, p. 1-13, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90002-1).

EDITORIALS: the world's goals to save humanity are hugely ambitious – but they are still the best option. **Nature**, v. 621, p. 227-229, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-023-02844-7>.

ELKINGTON, J. **Cannibals with forks**: the triple bottom line of 21st century business. [Gabriola Island]: New Society Publishers, 1998. 407 p.

EMBRAPA. **Relatório Grupo de Trabalho Sustentabilidade**: resolução do Diretor-Executivo - DEPI N. 28, DE 31 de julho de 2023. [Brasília, DF], 2023a. 42 p. Disponível em: https://www.embrapa.br/documents/3100676/88044353/Relat%C3%B3rio+GT+Sustentabilidade_nov_23/d915eab6-5c66-defd-b22e-a820e00668cd?version=1.0. Acesso em: 9 abr. 2025.

EMBRAPA. **Software SustenAgro**. [Brasília, DF], 2023b. Disponível em: <https://sustenagro.cnpma.embrapa.br/#/login>. Acesso em: 6 out. 2023.

EMBRAPA SOLOS. **IS_Agro – Indicadores Agro-socioambientais do Brasil**: inteligência estratégica para a sustentabilidade da agropecuária nacional. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1154982/1/Indicadores-agro-socioambientais-do-Brasil-2023.pdf>. Acesso em: 23 set. 2024.

EMBRAPA. **Visão de Futuro do Agro Brasileiro**. [Brasília, DF], 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao-de-futuro>. Acesso em: 25 abr. 2022.

EMROUZNEJAD, A.; YANG, G. A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978-2016. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 61, p. 4-8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.008>.

EPAMIG. **Indicadores de Sustentabilidade em Agrossistemas (ISA)**. Belo Horizonte, 2025. Disponível em: https://www.epamig.br/tecnologias_lista/indicadores-de-sustentabilidade-em-agrossistemas-isa/. Acesso em: 24 mar. 2025.

EUROPEAN UNION. OECD. **Agri-environmental Indicators Database**. [Paris], 2022a. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/agriculture/database/agri-environmental-indicators>. Acesso em: 5 set. 2023.

EUROPEAN UNION. OECD. **Environmental Indicators for Agriculture - Concepts and Framework**. [Paris]: OECD Press, 1999a. v. 1. Disponível em: <https://www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/40680795.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.

EUROPEAN UNION. OECD. **Environmental Indicators for Agriculture - Issues and Design**. [Paris]: OECD Press, 1999b. v. 2. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/environmental-indicators-for-agriculture_9789264173750-en. Acesso em: 11 set. 2023.

EUROPEAN UNION. OECD. **Environmental Indicators for Agriculture - Methods and results**. [Paris]: OECD Press, 2001. v. 3. Disponível em: <https://www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/40680869.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.

EUROPEAN UNION. OECD. Joint Research Center. **Handbook on Constructing Composite Indicators: methodology and user guide**. Paris, 2008. 162 p. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>.

EUROPEAN UNION. OECD. **Insights Into the measurement of agricultural total factor productivity and the environment**. [Paris], 2022b. Disponível em: <https://www.oecd.org/agriculture/topics/network-agricultural-productivity-and-environment>. Acesso em: 10 jul. 2023.

EUROPEAN UNION. OECD. **Green growth and sustainable development**. [Paris], 2023a. Disponível em: <https://www.oecd.org/greengrowth/>. Acesso em: 5 set. 2023.

EUROPEAN UNION. OECD. **OECD.Stat**. [Paris], 2023b. Disponível em: <https://stats.oecd.org/>. Acesso em: 5 set. 2023.

FAO. **Sustainability assessment of food and agriculture systems (SAFA)**. [Rome], 2014. Disponível em: <https://www.fao.org/sustainable-food-value-chains/home/en/>. Acesso em: 11 set. 2023.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados**: estatística e machine learning com Excel®, SPSS®, Stata®, R® e Python®. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2024. 1288 p.

FERNANDES, L. A. O.; WOODHOUSE, P. J. Family farm sustainability in southern Brazil: An application of agri-environmental indicators. **Ecological Economics**, v. 66, n. 2/3, p. 243-257, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.01.027>.

FERREIRA, I. **IBGE reforça compromisso com Agenda 2030 da ONU**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37745-ibge-reforca-compromisso-com-agenda-2030-da-onu?fbclid=PAAaYd_jNXUJ1c70xx0OcznOOyvtApisRGmSGiG04aqsF2bOpFyy4Xe_UIBHE. Acesso em: 5 set. 2023.

FERREIRA, J. M. L.; MARTINS, M. R.; CABRAL, L. L. F. B.; TERRA, J. O. L. Gestão ambiental: o papel protagonista do produtor rural. **Informe Agropecuário**, v. 35, p. 26-38, 2014. Edição especial. Disponível em: <https://www.epamig.br/wp-content/uploads/2023/03/IA-Edicao-especial-Artigo-Gestao-Ambiental.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2020.

FERREIRA, J. M. L.; VIANA, J. H. M.; COSTA, A. M.; SOUSA, D. V.; FONTES, A. A. Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas. **Informe Agropecuário**, v. 33, n. 271, p. 12-25, 2012. Disponível em: <https://www.epamig.br/wp-content/uploads/2023/03/art2-ia271.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2023.

FIRJAN. **IFDM 2018 - Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal – Ano-base 2016**. [Rio de Janeiro], 2018a. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/ifdm/downloads>. Acesso em: 5 set. 2023.

FIRJAN. **IFDM Metodologia**. [Rio de Janeiro], 2018b. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/ifdm/downloads/>. Acesso em: 5 set. 2023.

FONSECA, F. L.; ROVER, O. J.; WADT, L. H. O.; CARTAXO, C. B. C. Sustainability indicators of the Brazil nut tree management. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 56, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z21769478889>.

FRANCE. Council of Europe. **Concerted development of social cohesion indicators – methodological guide**. [Paris], 2005. Disponível em: https://www.coe.int/t/dg3/socialpolicies/socialcohesiondev/source/GUIDE_en.pdf. Acesso em: 5 set. 2023.

FU, Y.; XIANGTIANRUI, K.; LUO, H.; YU, L. Constructing composite indicators with collective choice and interval-valued TOPSIS: The case of value measure. **Social Indicators Research**, v. 152, p. 117-135, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-020-02422-8>.

GAN, X.; FERNANDEZ, I. C.; GUO, J.; WILSON, M.; ZHAO, Y.; ZHOU, B.; WU, J. When to use what: Methods for weighting and aggregating sustainability indicators. **Ecological Indicators**, v. 81, p. 491-502, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.068>.

GIRARDIN, P.; BOCKSTALLER, C.; VAN DER WERF, H. Indicators: tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 13, n. 4, p. 5-21, 1999. DOI: https://doi.org/10.1300/J064v13n04_03.

GOMES, E. G.; ABREU, U. G. P.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; CARVALHO, T. B.; ZEN, S. Análise de tipologias de sistemas de produção modais de pecuária de cria pelo uso do método ordinal de Copeland. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 5, n. 1, p. 43-57, 2013. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/861904/1/SPOLM2010Analisedetipologiasdesistemasdeproducaomodal2010.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2023.

GOMES, E. G.; ABREU, U. G. P.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; CARVALHO, T. B.; ZEN, S. Unitary input DEA model to identify beef cattle production systems typologies. **Pesquisa Operacional**, v. 32, n. 2, p. 389-406, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382012005000015>.

GOMES, E. G.; ANGULO-MEZA, L. Proposta de uma medida de ecoeficiência DEA para avaliar sistemas de produção agropecuária. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 56., 2024, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: UFC: ECE: IFCE: UNIFOR, 2024. Ref. 308176. Disponível em: <https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2024/>

[trabalhos/proposta-de-uma-medida-de-ecoeficiencia-dea-para-avaliar-sistemas-de-producao-ag?lang=pt-br](#). Acesso em: 18 ago. 2025.

GOMES, E. G.; LINS, M. P. E. Integrating geographical information systems and multi-criteria methods: a case study. **Annals of Operations Research**, v. 116, p. 243-269, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021344700828>.

GOMES, E. G.; SANTOS, S. A.; PAULA, E. S.; NOGUEIRA, M. A.; OLIVEIRA, M. D.; SALIS, S. M.; SORIANO, B. M. A.; TOMAS, W. M. Multidimensional performance assessment of a sample of beef cattle ranches in the Pantanal from a data envelopment analysis perspective. **Ciência Rural**, v. 53, e20220595, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220595>.

GOMES, E. G.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; SOUZA, G. S.; ANGULO MEZA, L.; MANGABEIRA, J. A. C. Efficiency and sustainability assessment for a group of farmers in the Brazilian Amazon. **Annals of Operations Research**, v. 169, p. 167-181, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-008-0390-6>.

GOMES, L. F. A. M.; GONZÁLEZ-ARAYA, M. C.; CARIGNANO, C. **Tomada de Decisões em Cenários Complexos**. [São Paulo]: Thomson, 2004. 168 p.

GOMEZ, A. A.; KELLY, D. E. S.; SYERS, J. K.; COUGHLAN, K. J. Measuring sustainability of agricultural systems at the farm level. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1997. 410 p. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(97\)00090-3](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(97)00090-3).

GÓMEZ-LIMÓN, J. A.; ARRIAZA, M.; GUERRERO-BAENA, M. D. Building a composite indicator to measure environmental sustainability using alternative weighting methods. **Sustainability**, v. 12, n. 11, 4398, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12114398>.

GOVINDAN, K.; JEPSEN, M. B. ELECTRE: a comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 250, n. 1, p. 1-29, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.019>.

GRECO, S.; ISHIZAKA, A.; TASIIOU, M.; TORRISI, G. On the methodological framework of composite indices. **Social Indicators Research**, v. 141, n. 1, p. 61-94, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9>.

HAHN, M. B.; RIEDERER, A. M.; FOSTER, S. O. The Livelihood Vulnerability Index: A pragmatic approach to assessing risks from climate variability and change: a case study in Mozambique. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 1, p. 74-88, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.11.002>.

HANISCH, A. L.; NEGRELLE, R. R. B.; BONATTO, R. A.; NIMMO, E. R.; LACERDA, A. E. B. Evaluating sustainability in traditional silvopastoral systems (caívas): looking beyond the impact of animals on biodiversity. **Sustainability**, v. 11, 3098, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11113098>.

HAQ, S. U.; BOZ, I. Measuring environmental, economic, and social sustainability index of tea farms in Rize Province, Turkey. **Environmental, Development Sustainability: a multidisciplinary approach to the theory and practice of sustainable development**, v. 22, n. 3, p. 2545-2567, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00310-x>.

HATEFI, S. M.; TORABI, S. A. A common weight MCDA–DEA approach to construct composite indicators. **Ecological Economics**, v. 70, n. 1, p. 114-120, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.08.014>.

IBGE. Diretoria de Pesquisas. **Evolução dos indicadores não monetários de pobreza e qualidade de vida no Brasil com base na pesquisa de orçamentos familiares**. [Rio de Janeiro], 2023a. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/2be2149df2a3bd24a87211df2c82f16c.pdf. Acesso em: 5 set. 2023.

IBGE. **Indicadores brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. [Rio de Janeiro], 2023b. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/home/NewHome>. Acesso em: 5 set. 2023.

IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável IDS**. [Rio de Janeiro], 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ids/tabelas>. Acesso em: 5 set. 2023.

IBRAHIM, M.; BAHADUR KC, K.; FRASER, E. D. G. Bridging the gap in sustainability measurement and reporting for agroecosystems: overview and development of an adaptive sustainability assessment and monitoring framework. **Ecological Indicators**, v. 170, 113091, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113091>.

ISE B3. **Metodologia do Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) da B3**. 2023a. Disponível em: <https://iseb3.com.br/metodologia>. Acesso em: 6 set. 2023.

ISE B3. **Questionário do Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) da B3**. 2023b. Disponível em: <https://iseb3.com.br/questionario-ise-b3-2023>. Acesso em: 6 set. 2023.

JESUS, K. R. E.; TORQUATO, S. A.; MACHADO, P. G.; ZORZO, C. R. B.; CARDOSO, B. O.; LEAL, M. R. L. V.; PICOLI, M. C. A.; RAMOS, R. C.; DALMAGO, G. A.; CAPITANI, D. H. D.; DUFT, D. G.; SUÁREZ, J. G.; PIEROZZI JUNIOR, I.; TREVELIN, L. C.; MOREIRA, D. A. Sustainability assessment of sugarcane production systems: SustenAgro Decision Support System. **Environmental Development**, v. 32, 100444, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.05.003>.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 6th ed. [London]: Pearson, 2007. 808 p.

KARAGIANNIS, R.; KARAGIANNIS, G. Constructing composite indicators with Shannon entropy: the case of Human Development Index. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 70, 100701, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.03.007>.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 569 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084>.

KELLY, E.; LATRUFFE, L.; DESJEUX, Y.; RYAN, M.; UTHES, S.; DIAZABAKANA, A.; DILLON, E.; FINN, J. Sustainability indicators for improved assessment of the effects of agricultural policy across the EU: Is FADN the answer? **Ecological Indicators**, v. 89, p. 903-911, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.053>.

KIMPARA, J. M.; RODRIGUES, L. A.; VETORELLI, M.; COSTA, C. M.; DIEGO, F.; VALENTI, W. C. **Indicadores de aquicultura sustentável**: rede de pesquisa em aquicultura sustentável. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2018. 2 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1099086>. Acesso em: 9 abr. 2025.

KNOEPFEL, I.; HAGART, G. **Future proof?**: embedding environmental, social and governance issues in investment markets: outcomes of the who cares wins initiative, 2004-2008. [New York]: United Nations Digital Library, 2009. 44 p. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/681662>. Acesso em: 12 set. 2023.

KORHONEN, P.; SOISMAA, M.; SILJAMÄKI, A. On the use of value efficiency analysis and some further developments. **Journal of Productivity Analysis**, v. 17, p. 49-64, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013532219759>.

LARA, S. G. **Quem (não) participa do índice de sustentabilidade empresarial - ISE B3(?) é mais valorizado?** 2020. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

LATRUFFE, L.; DESJEUX, Y.; HANITRAVELO, G. L. J.; HENNESSY, T.; BOCKSTALLER, C.; DUPRAZ, P.; FINN, J. **Tradeoffs between economic, environmental and social sustainability**: the case of a selection of European farms. Wageningen: European Commission's 7th, 2016a. 46 p. Disponível em: <https://hal.science/hal-01611416/>. Acesso em: 12 set. 2023.

LATRUFFE, L.; DIAZABAKANA, A.; BOCKSTALLER, C.; DESJEUX, Y.; FINN, J.; KELLY, E.; RYAN, M.; UTHES, S. Measurement of sustainability in agriculture: a review of indicators. **Studies in Agricultural Economics**, v. 118, n. 3, p. 123-130, 2016b. DOI: <https://dx.doi.org/10.7896/j.1624>.

LEBACQ, T.; BARET, P. V.; STILMANT, D. Sustainability indicators for livestock farming: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 2, p. 311-327, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0121-x>.

LI, M.; WANG, J.; CHEN, Y. Evaluation and influencing factors of sustainable development capability of agriculture in countries along the Belt and Road

Route. **Sustainability**, v. 11, n. 7, 2004, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11072004>.

LIN, C.-N. A fuzzy analytic hierarchy process-based analysis of the dynamic sustainable management index in leisure agriculture. **Sustainability**, v. 12, n. 13, 5395, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12135395>.

LIU, J. S.; LU, L. Y. Y.; LU, W. M.; LIN, B. J. Y. A survey of DEA applications. **Omega**, v. 41, n. 5, p. 893-902, 2013a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.11.004>.

LIU, J. S.; LU, L. Y. Y.; LU, W. M.; LIN, B. J. Y. Data envelopment analysis 1978–2010: a citation-based literature survey. **Omega**, v. 41, n. 1, p. 3-15, 2013b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.12.006>.

LIU, J. S.; LU, L. Y. Y.; LU, W. M. Research fronts in data envelopment analysis. **Omega**, v. 58, p. 33–45, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.04.004>.

LOVELL, C. K.; PASTOR, J. Radial DEA models without inputs or without outputs. **European Journal of Operational Research**, v. 118, n. 1, p. 46-51, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00338-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00338-5).

LOZANO, R. Analysing the use of tools, initiatives, and approaches to promote sustainability in corporations. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 27, n. 2, p. 982-998, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/csr.1860>.

MAESANO, G.; CHINNICI, G.; FALCONE, G.; BELLIA, C.; RAIMONDO, M.; D'AMICO, M. Economic and environmental sustainability of olive production: a case study. **Agronomy**, v. 11, n. 9, 1753, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091753>.

MAIO, A. **Publicação internacional mostra processo de construção do Programa Fazenda Pantaneira Sustentável**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/22881272/publicacao-internacional-mostra-processo-de-construcao-do-programa-fazenda-pantaneira-sustentavel>. Acesso em: 13 set. 2023.

MAMAT, L.; BASRI, N. E. A.; ZAIN, S. M.; RAHMAH, E. Environmental sustainability indicators as impact tracker: a review. **Journal of Sustainability Science and Management**, v. 11, n. 1, p. 29-42, 2016. Disponível em: <https://jssm.umt.edu.my/wp-content/uploads/2016/06/3-web.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2020.

MANGABEIRA, J. A. de C.; PINTO, D. M.; SCARAZATTI, B. **Guia Metodológico**: geração de indicadores de desempenho e índice multicritério de sustentabilidade para agricultura familiar no bioma Amazônia. Campinas: Embrapa Territorial, 2021. 67 p. (Embrapa Territorial. Documentos, 138). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1133822>. Acesso em: 26 jun. 2022.

MAROZZI, M.; BOLZAN, M.; DI ZIO, S. Robust weighted aggregation of expert opinions in futures studies. **Annals of Operations research**, v. 342, n. 3, p. 1471-1493, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04990-z>.

MARQUES, J. F.; SKORUPA, L. A.; FERRAZ, J. M. G. (ed.). **Indicadores de sustentabilidade em agroecossistema**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. 283 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/14015>. Acesso em: 26 jun. 2020.

MARQUES, P. A. S.; FERREIRA, J. M. L. Aplicativo ISApp. **Informe Agropecuário**, v. 38, n. 300, p. 73-80, 2017. Disponível em: <https://www.livrariaepamig.com.br/wp-content/uploads/2023/02/IA-300.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2020.

MARTINS, A. L. da S.; DOSSA, A. A.; SANTI, A.; DE BONA, F. D.; DENARDIN, J. E.; LUNARDI, L.; HERNANI, L. C. Índice de qualidade participativo do sistema plantio direto para a região do Alto Uruguai, RS - IQP-RAU. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2020. 29 p. (Embrapa Trigo. Documentos online, 190). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1132145>. Acesso em: 18 ago. 2025.

MASERA, O.; ASTIER, M.; LÓPEZ-RIDAURA, S. **Sustentabilidad y manejo de recursos naturales**: el marco de evaluación MESMIS. México: Mundi-Prensa, 1999. 109 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/299870632_Sustentabilidad_y_manejo_de_recursos_naturales_El_Marco_de_evaluacion_MESMIS. Acesso em: 25 jun. 2020.

MAYER, A. L. Strengths and weaknesses of common sustainability indices for multidimensional systems. **Environment International**, v. 34, n. 2, p. 277-291, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.09.004>.

MEDNE, A.; LAPINA, I. Sustainability and continuous improvement of organization: review of process-oriented performance indicators. **Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity**, v. 5, n. 3, 49, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/joitmc5030049>.

MENCARINI, E. S.; AMATO NETO, J. **Avaliando o desempenho do Índice de Sustentabilidade Empresarial e as implicações da sustentabilidade para o setor privado**. 2008. 10 p. Disponível em: <https://sites.usp.br/redcoop/wp-content/uploads/sites/633/2019/11/fcav-amato-2008.pdf>. Acesso em: 6 set. 2023.

MENDES, I. de C.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; SOUSA, D. M. G. de; SILVA, O. D. D. da; OLIVEIRA, M. I.; MALAQUIAS, J. V. **Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2021. 50 p. (Embrapa Cerrados, Documentos, 369). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1133109>. Acesso em: 2 jan. 2020.

MENDES, R.; BARROS, I. de; D'ANDRÉA, P. A.; D'ANDRÉA-KÜHL, M. S. C.; RODRIGUES, G. S. A multi-attribute approach to evaluating the impact of biostimulants on crop performance. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1214112>.

MORETTIN, P. A.; SINGER, J. M. **Estatística e ciência de dados**. Rio de Janeiro: LTC, 2023. 454 p.

MUNDA, G. Choosing aggregation rules for composite indicators. **Social Indicators Research**, v. 109, n. 3, p. 337-354, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-011-9911-9>.

MUNDA, G. Social multi-criteria evaluation: methodological foundations and operational consequences. **European Journal of Operational Research**, v. 158, n. 3, p. 662-677, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00369-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00369-2).

NADARAJA, D.; LU, C.; ISLAM, M. M. The sustainability assessment of plantation agriculture - a systematic review of sustainability indicators. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, n. 5, p. 892-910, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.042>.

NARDO, M.; SAISANA, M.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S. **Tools for composite indicators building**. [Varese]: European Commission, Joint Research Centre. Institute for the Protection and Security of Citizen Econometrics and Statistical Support to Antifraud Unit, 2005. 134 p. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC31473>. Acesso em: 5 set. 2023.

NETO, J.; CUNHA, M. Agricultural sustainability assessment using multicriteria indicators and hierarchical tools – a review. **International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics**, v. 6, n. 4, p. 381-400, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1504/IJSAMI.2020.112849>.

ODGÓRSKI, D. Measuring operational performance of OSH management system: a demonstration of AHP-based selection of leading key performance indicators. **Safety Science**, v. 73, p. 146-166, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.11.018>.

O'DONOGHUE, C.; DEVISME, S.; RYAN, M.; CONNEELY, R.; GILLESPIE, P.; VROLIJK, H. Farm economic sustainability in the European Union: a pilot study. **Studies in Agricultural Economics**, v. 118, n. p. 163-171, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.7896/j.1631>.

OLDE, A. M.; OUDSHOORN, F. W.; SØRENSEN, C. A. G.; BOKKERS, E. A. M.; DE BOER, I. J. M. Assessing sustainability at farm-level: lessons learned from a comparison of tools in practice. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 391-404, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.047>.

OLIVEIRA, F. C.; COLLADO, A. C.; LEITE, L. F. C. Autonomy and sustainability: an integrated analysis of the development of new approaches to agrosystem management in family-based farming in Carnaubais Territory, Piauí, Brazil. **Agricultural Systems**, v. 115, p. 1-9, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.09.005>.

ORSATO, R. J.; GARCIA, A.; MENDES-DA-SILVA, W.; SIMONETTI, R.; MONZONI, M. Sustainability indexes: why join in? a study of the 'Corporate

Sustainability Index (ISE)' Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 161-170, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.071>.

OYA, C.; SCHAEFER, F.; SKALIDOU, D. The effectiveness of agricultural certification in developing countries: a systematic review. **World Development**, v. 112, p. 282-312, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.001>.

PACINI, C.; LAZZERINI, G.; MIGLIORINI, P.; VAZZANA, C. An indicator-based framework to evaluate sustainability of farming systems: review of applications in Tuscany. **Italian Journal of Agronomy**, v. 4, n 1, p. 23-39, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4081/ija.2009.1.23>.

PARRIS, K. **OECD Agri-Environmental Indicators**. In: FRAMEWORKS to measure sustainable development: an OECD expert workshop. [Paris]: OECD Press, 2000. p. 125-136. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2000/02/frameworks-to-measure-sustainable-development_g1ghg252/9789264180635-en.pdf. Acesso em: 10 jun. 2022.

PEREIRA, I. dos S.; PILLON, C. N.; MARTINAZZO, R.; ÁVILA, M. R. de; BAMBERG, A. L.; SILVEIRA, C. A. P.; CUNHA, H. N. da; GOMES, G. C.; SPIERING, V.; MIURA, A. K.; WINCKLER, L. T.; EICHOLZ, E. D.; SCHIEDECK, G.; FELDBERG, N. P.; BENDER, S. E.; SCHWENGBER, J. E.; VALGAS, R. A.; GUARINO, E. de S. G.; ANTUNES, I. F.; BARBIERI, R. L.; HOFFMANN, A.; REISSER JUNIOR, C. Índice de Sustentabilidade Auera como modelo de avaliação de sustentabilidade em propriedades agrícolas familiares. **Revista DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, v. 1, n. 58, e1596, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n58-001>.

PODINOVSKII, V. V. Criteria importance theory. **Mathematical Social Science**, v. 27, n. 3, p. 237-252, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-4896\(93\)00737-F](https://doi.org/10.1016/0165-4896(93)00737-F).

PRETTY, J. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, p. 447-465, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163>.

RAHDARI, A. F.; ROSTAMY, A. A. A. Designing a general set of sustainability indicators at the corporate level. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 757-771, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.108>.

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. da S.; BONA, F. D. de. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1071114>. Acesso em: 20 abr. 2020.

RAO, C. S.; KAREEMULLA, K.; KRISHNAN, P.; MURTHY, G. R. K.; RAMESH, P.; ANANTHAN, P. S.; JOSHI, P. K. Agro-ecosystem based sustainability indicators for climate resilient agriculture in India: a conceptual framework. **Ecological Indicators**, v. 105, p. 621-633, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.038>.

RAPPORT, D.; FRIEND, A. **Towards a comprehensive framework for environmental statistics: a stress-response approach**. Ottawa: Statistics Canada. Canadian Minister of Industry, Trade and Commerce, 1979. 90 p. Disponível em: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.896799/publication.html>. Acesso em: 20 jun. 2020.

REBOLLEDO-LEIVA, R.; ANGULO-MEZA, L.; IRIARTE, A.; GONZÁLEZ-ARAYA, M. C.; VÁSQUEZ-IBARRA, L. Comparing two CF+DEA methods for assessing eco-efficiency from theoretical and practical points of view. **Science of the Total Environment**, v. 659, p. 1266-1282, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.296>.

REIG-MARTÍNEZ, R.; GÓMEZ-LIMÓN, J. A.; PICAZO-TADEO, A. J. Ranking farms with a composite indicator of sustainability. **Agricultural Economics**, v. 42, n. 5, p. 561-575, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2011.00536.x>.

REIS, J. C.; RODRIGUES, G. S.; BARROS, I.; RODRIGUES, R. A. R.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; KAMOI, M. Y. T.; MICHETTI, M.; WRUCK, F. J., RODRIGUES-FILHO, S. Fuzzy logic indicators for the assessment of farming sustainability strategies in a tropical agricultural

frontier. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 43, n. 8, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00858-5>.

RIGBY, D.; HOWLETT, D.; WOODHOUSE, P. **Sustainability indicators for natural resource management and policy - Working Paper 1: a review of indicators of agricultural and rural livelihood sustainability**. [Bradford: Bradford University]; [Manchester: Manchester University]; [Alice: University of Fort Hare], 2000. 29 p. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57a08d4e40f0b649740017ae/1RigbyHowlettWoodhouse.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.

ROBLING, H.; HATAB, A. A.; SÄLL, S.; HANSSON, H. Measuring sustainability at farm level: a critical view on data and indicators. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 18, 100258, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100258>.

RODRIGUES, G. S. **Avaliação de impactos socioambientais de tecnologias na Embrapa**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2015. 41 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 99). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1020852>. Acesso em: 18 ago. 2025.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C. Sistema integrado de avaliação de impacto ambiental aplicado a atividades do Novo Rural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 4, p. 445-451, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000400001>.

RODRIGUES, G. S.; MARTINS, C. R.; BARROS, I. de. Sustainability assessment of ecological intensification practices in coconut production. **Agricultural Systems**, v. 165, p. 71-84, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.001>.

RODRIGUES, G. S.; MOREIRA, A. (coord.). **Manual de evaluación de impacto ambiental de actividades rurales**. Montevideo: IICA-PROCISUR, 2007. 168 p. Disponível em: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/7800>. Acesso em: 12 set. 2023.

RODRIGUES, G. S.; RODRIGUES, I. A.; BUSCHINELLI, C. C. A.; BARROS, I. Integrated farm sustainability assessment for the environmental management of rural activities. **Environmental Impact Assessment**

Review, v. 30, n. 4, p. 229-239, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.10.002>.

ROY, B.; BOUYSSOU, D. **Aide multicritère à la décision**: méthodes et cas. Paris: Economica, 1993. 695 p. (Economica. Série Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion). Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Denis_Bouyssou/publication/265441342_Aide_Multicritere_a_la_Decision_Methodes_et_Cas. Acesso em: 9 mar. 2020.

ROY, R.; CHAN, N. W. An assessment of agricultural sustainability indicators in Bangladesh: review and synthesis. **The Environmentalist**, v. 32, n. 1, p. 99-110, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10669-011-9364-3>.

RUIZ-ALMEIDA, A.; RIVERA-FERRE, M. G. Internationally-based indicators to measure agri-food systems sustainability using food sovereignty as a conceptual framework. **Food Security**, v. 11, p. 1321-1337, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12571-019-00964-5>.

RUIZ, J. F.; BARAHONA-ROSALES, R.; BOLÍVAR-VERGARA, D. M. Indicadores de sustentabilidad para lechería especializada: una revisión. **Livestock Research for Rural Development**, v. 29, n. 1, 9, 2017. Disponível em: <http://www.lrrd.org/lrrd29/1/ruiz29009.html>. Acesso em: 20 mar. 2020.

RYAN, M.; HENNESSY, T.; BUCKLEY, C.; DILLON, E. J.; DONNELLAN, T.; HANRAHAN, K.; MORAN, B. Developing farm-level sustainability indicators for Ireland using the Teagasc National Farm Survey. **Irish Journal of Agricultural and Food Research**, v. 55, n. 2, p. 112-125, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1515/ijaf-2016-0011>.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process: what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3/5, p. 161-176, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

SABAGHI, M.; MASCLE, C.; BAPTISTE, P.; ROSTAMZADEH, R. Sustainability assessment using fuzzy-inference technique (SAFT): a methodology toward green products. **Expert Systems and Applications**, v. 56, p. 69-79, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.02.038>.

SAISANA, M.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S. Uncertainty and sensitive analysis techniques as tools for the quality assessment of a composite indicator. **Journal of Royal Statistics Society A**, v. 168, n. 2, p. 307-323, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2005.00350.x>.

SAJADIAN, M.; KHOSHBAKHT, K.; LIAGHATI, H.; VEISI, H.; DAMGHANI, A. M. Developing and quantifying indicators of organic farming using analytic hierarchy process. **Ecological Indicators**, v. 83, p. 103-111, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.047>.

SALEH, R.; EHLERS, M. H. Exploring farmers' perceptions of social sustainability. **Environment, Development and Sustainability**, v. 27, p. 6371-6396, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04140>.

SANNOU, R. O.; KIRSCHKE, S.; GÜNTHER, E. Integrating the social perspective into the sustainability assessment of agri-food systems: a review of indicators. **Sustainable Production and Consumption**, v. 39, p. 175-190, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.014>.

SANTOS, S. A.; CARDOSO, E. L.; CRISPIM, S. M. A.; SORIANO, B. M. A.; GARCIA, J. B.; BERSELLI, C. **Protocolo: Índice de Conservação e Produtividade das Pastagens (ICPP) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS)**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2014. 18 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 130). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1010365>. Acesso em: 20 jan. 2020.

SANTOS, S. A.; LIMA, H. P. de; MASSRUHA, S. M. F. S.; ABREU, U. G. P. de; TOMAS, W. M.; SALIS, S. M. de; CARDOSO, E. L.; OLIVEIRA, M. D. de; SOARES, M. T. S.; SANTOS JÚNIOR, A.; OLIVEIRA, L. O. F. de; CALHEIROS, D. F.; CRISPIM, S. M. A.; SORIANO, B. M. A.; AMANCIO, C. O. da G.; NUNES, A. P.; PELLEGRIN, L. A. A fuzzy logic-based tool to assess beef cattle ranching sustainability in complex environmental systems. **Journal of Environmental Management**, v. 198, pt. 2, p. 95-106, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.076>.

SANTOS, S. A.; OLIVEIRA, L. O. F. de; LIMA, H. P. de; ABREU, U. G. P. de; OLIVEIRA, M. D. de; ARAUJO, M. T. B. D. **Protocolo: Índice de manejo e bem estar do rebanho (IMBA) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS)**. Corumbá, MS: Embrapa Pantanal, 2015. 20 p. (Embrapa Pantanal).

Documentos, 135). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1036693>. Acesso em: 15 jan. 2020.

SCHALLER, N. Sustainable agriculture and the environment: the concept of agricultural sustainability. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 46, n.1/4, p. 89/97, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(93\)90016-I](https://doi.org/10.1016/0167-8809(93)90016-I).

SHEN, Y.; HERMANS, E.; BRIJS, T.; WETS, G. Data envelopment analysis for composite indicators: a multiple layer model. **Social Indicators Research**, v. 114, p. 739-756, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-012-0171-0>.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade**, v. 10, n. 2, p. 137-148, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2007000200009>.

SILVESTRI, C.; SILVESTRI, L.; PICCAROZZI, M.; RUGGIERI, A. Toward a framework for selecting indicators of measuring sustainability and circular economy in the agri-food sector: a systematic literature review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 29, n. 8, p. 1446-1484, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02032-1>.

SINISTERRA-SOLÍS, N. K.; SANJÚAN, N.; RIBAL, J.; ESTRUCH, V.; CLEMENTE, G.; ROZAKIS, S. Developing a composite indicator to assess agricultural sustainability: Influence of some critical choices. **Ecological Indicators**, v. 161, 111934, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111934>.

SLÄTMO, E.; FISCHER, K.; RÖÖS, E. The framing of sustainability in sustainability assessment frameworks for agriculture. **Sociologia Ruralis**, v. 57, n. 3, p. 378-395, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/soru.12156>.

SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; GOMES, E. G.; LETA, F. R.; PESSOLANI, R. B. V. Conceitos básicos do apoio multicritério à decisão e sua aplicação no Projeto Aerodesign. **Engevista**, v. 5, n. 8, p. 22-35, 2003. DOI: <https://doi.org/10.22409/engevista.v5i8.82>.

SOARES, M. T. S.; OLIVEIRA, M. D. de; CALHEIROS, D. F.; SANTOS, S. A.; LIMA, H. P. de. **Protocolo**: Índice de Conservação de Corpos de Água Naturais (ICA) para a Fazenda Pantaneira Sustentável (FPS). Corumbá: Embrapa Pantanal, 2014. 22p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 128). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1009965>. Acesso em: 20 dez. 2017.

SØNDERGAARD, N.; SÁ, C. D. de; BARROS-PLATIAU, A. F. (ed.). **Sustainability challenges of Brazilian agriculture**: governance, inclusion, and innovation. [New York]: Springer, 2023. 470 p. (Environment & Policy, 64). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-29853-0>.

SOUZA, G. da S. e; GOMES, E. G.; ALVES, E. R. de A. Função de produção com base nos microdados do Censo Agropecuário de 2017. **Revista de Política Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 6-82, 2020. Disponível em: <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/1654>. Acesso em: 10 jan. 2021.

SOUZA, G. da S. e; GOMES, E. G.; ALVES, E. R. de A. Two-part fractional regression model with conditional FDH responses: an application to Brazilian agriculture. **Annals of Operations Research**, v. 314, p. 393-409, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03752-z>.

SOUZA, G. da S. e; GOMES, E. G. Assessing the influence of external factors on agricultural production in Brazil. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 85, 101440, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101440>.

SOUZA, R. M.; ANGELO, H.; ALMEIDA, A. N. de; GASPAR, R. de O.; PAULA, M. F. de. Environmental sustainability index of rural properties in the Federal District, Brazil. **Sustainability**, v. 14, n. 24, 16738, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416738>.

SOUZA, R. P. Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE B3): uma análise do questionário de ingresso no índice com vistas à evolução das empresas nos critérios ambientais, sociais e econômicos. 2022. 114 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Organizações e Sistemas Públicos) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.

STREIMIKIS, J.; BALEŽENTIS, T. Agricultural sustainability assessment framework integrating sustainable development goals and interlinked

priorities of environmental, climate and agriculture policies. **Sustainable Development**, v. 28, n. 6, p. 1702-1712, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/sd.2118>.

SULLIVAN, C. A.; MEIGH, J. R.; FEDIW, T. S. **Derivation and testing of the Water Poverty Index Phase 1**: final report. Wallingford: Centre for Ecology and Hydrology, 2002. 603 p. Disponível em: <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/503246>. Acesso em: 7 out. 2024.

SURESH, A.; KRISHNAN, P.; JHA, G. K.; REDDY, A. A. Agricultural sustainability and its trends in India: a macro-level index-based empirical evaluation. **Sustainability**, v. 14, n. 5, 2540, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14052540>.

SU, W.; CHEN, S.; ZHANG, C.; LI, K. W. A subgroup dominance-based benefit of the doubt method for addressing rank reversals: a case study of the human development index in Europe. **European Journal of Operational Research**, v. 307, n. 3, p. 1299-1317, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.11.030>.

TALUKDER, B.; HIPEL, K. W.; VANLOON, G. W. Developing composite indicators for agricultural sustainability assessment: effect of normalization and aggregation techniques. **Resources**, v. 6, n. 4, 66, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources6040066>.

TELLES, T. S.; RIGHETTO, A. J.; LOURENÇO, M. A. P.; BARBOSA, G. M. C. No-tillage system participatory quality index. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 128-133, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n2p128-133>.

THANASSOULIS, E.; PORTELA, M. C.; ALLEN, R. Incorporating value judgements in DEA. In: COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; ZHU, J. (ed.). **Handbook on data envelopment analysis**. 2nd ed. Norwell: Kluwer, 2004. p. 99-138. (International Series in Operations Research & Management Science, 71). DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-7798-X_4.

THIVIERGE, M.-N.; PARENT, D.; BÉLANGER, V.; ANGERS, D. A.; ALLARD, G.; PELLERIN, D.; VANASSE, A. Environmental sustainability indicators for cash-crop farms in Quebec, Canada: a participatory approach. **Ecological**

Indicators, v. 45, p. 677-686, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.024>.

TILMAN, D.; CASSMAN, K.G.; MATSON, P.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, p. 671-677, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01014>.

TOFALLIS, C. Add or multiply? A tutorial on ranking and choosing with multiple criteria. **INFORMS Transactions on Education**, v. 14, n. 3, p. 109-119, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3762021>.

TSAPLES, G.; PAPATHANASIOU, J.; GEORGIOU, A. C. An exploratory DEA and machine learning framework for the evaluation and analysis of sustainability composite indicators in the EU. **Mathematics**, v. 10, n. 13, 2277, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10132277>.

TZOURAMANI, I.; MANTZIARIS, S.; KARANIKOLAS, P. Assessing sustainability performance at the farm level: examples from Greek agricultural systems. **Sustainability**, v. 12, n. 7, 2929, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12072929>.

WORLD BANK GROUP. **World Bank open data**. [Washington, DC], 2023. Disponível em: <https://data.worldbank.org/>. Acesso em: 5 set. 2023.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **Human Development Report 2021-22 – Uncertain times, unsettled lives**: shaping our future in a transforming world. [New York], 2022. Disponível em: <https://hdr.undp.org/content/human-development-report-2021-22>. Acesso em: 5 set. 2023.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **Human Development Report**. [New York], 2023a. Disponível em: <https://hdr.undp.org/>. Acesso em: 5 set. 2023.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **PNUD Brasil: Atlas dos Municípios**. [Brasília, DF], 2023b. Disponível em: <https://www.undp.org/pt/brazil/atlas-dos-municipios>. Acesso em: 5 set. 2023.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **PNUD IPEA FJP: Desenvolvimento Humano Municipal Brasileiro – Atlas do Desenvolvimento**

Humano 2013. [Brasília, DF], 2013. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/acervo/biblioteca>. Acesso em: 5 set. 2023.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **PNUD IPEA FJP**: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal IDHM – Metodologia. [Brasília, DF, 2020]. Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/acervo/atlas>. Acesso em: 5 set. 2023.

UNITED NATIONS. Global Compact. Pacto Global Rede Brasil. **Pacto Global - Stilingue**: a evolução do ESG no Brasil. [São Paulo], 2021. Disponível em: <https://www.pactoglobal.org.br/esg>. Acesso em: 12 set. 2023.

UNITED NATIONS. **Global Sustainable Development Report (GSDR)**. [New York], 2023. Disponível em: <https://sdgs.un.org/gsdr/gsdr2023>. Acesso em: 5 set. 2023.

UNITED NATIONS. **Our Common Future (Brundtland Report)**. Report of the World Commission on Environment and Development. [New York], 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.

UNITED NATIONS. **Who Cares Wins - Connecting Financial Markets to a Changing World**. [New York], 2004. Disponível em: https://www.unepfi.org/fileadmin/events/2004/stocks/who_cares_wins_global_compact_2004.pdf. Acesso em: 12 set. 2023.

VALENTI, W. C.; KIMPARA, J. M.; PRETO, B. L.; MORAES-VALENTI, P. Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. **Ecological Indicators**, v. 88, p. 402-413, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.068>.

VAN LEMMEN-GERDESSEN, J.; PASCUCCHI, S. Data envelopment analysis of sustainability indicators of European agricultural systems at regional level. **Agricultural Systems**, v. 118, p. 78-90, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.03.004>.

VAN PASSEL, S.; NEVEN, F.; MATHIJS, E.; VAN HUYLENBROECK, G. Measuring farm sustainability and explaining differences in sustainable efficiency. **Ecological Economics**, v. 62, n. 1, p. 149-161, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.06.008>.

VÁSQUEZ-IBARRA, L.; REBOLLEDO-LEIVA, R.; ANGULO-MEZA, L.; GONZÁLEZ-ARAYA, M. C.; IRIARTE, A. The joint use of life cycle assessment and data envelopment analysis methodologies for eco-efficiency assessment: a critical review, taxonomy and future research. **Science of the Total Environment**, v. 738, 139538, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139538>.

VEIGA, M. de O.; RABÊLO, O. da S.; DURANTE, L. C.; TEIXEIRA, R. F. da S.; DALLA NORA, G.; VENERE, P. C. Indicadores de sustentabilidade socioeconômica e ambiental dos assentamentos da reforma agrária em Mato Grosso - Brasil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, e532101523320, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23320>.

VEISI, H.; LIAGHATI, H.; ALIPOUR, A. Developing an ethics-based approach to indicators of sustainable agriculture using Analytic Hierarchy Process (AHP). **Ecological Indicators**, v. 60, p. 644-654, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.012>.

VELTEN, S.; LEVENTON, J.; JAGER, N.; NEWIG, J. What is sustainable agriculture? a systematic review. **Sustainability**, v. 7, n. 6, p. 7833-7865, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7067833>.

VERMA, M.; SHARMA, P.; JOE, E. T. A systematic comparative assessment of certification standards in India and suggested evaluation frameworks. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, 722439, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.722439>.

VIANA, J. G. A.; BARROS, C. A. P.; RIBEIRO, C. G.; MINELLA, J. P. G.; SANTOS, C. F.; RIBEIRO, C. M.; LANGBECKER, T. B.; SILVEIRA, V. C. P.; TOURRAND, J. F. Sustainability indicators for farming systems in Pampa biome of Brazil: a methodological approach NEXUS-MESMIS. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 22, n. 2, e0103, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5424/sjar/2024222-20523>.

VIEIRA, A. C. L.; OLIVEIRA, M. D.; BANA E COSTA, C. A. Enhancing knowledge construction processes within multicriteria decision analysis: the collaborative value modelling framework. **Omega**, v. 94, 102047, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.03.005>.

VOISIN, R.; GODRICH, S.; BLAKE, D.; SAMBELL, R.; HERRINGTON, S. Comprehensive assessment instruments for place-based sustainable agriculture: a scoping review. **Sustainability Science**, v. 20, p. 1037-1054, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11625-025-01629-3>.

WALESIK, M. The choice of normalization method and rankings of the set of objects based on composite indicator values. **Statistics in Transition New Series**, v. 19, n. 4, p. 693-710, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21307/stattrans-2018-036>.

WANG, H. A generalized MCDA-DEA (multi-criterion decision analysis - data envelopment analysis) approach to construct slacks-based composite indicator. **Energy**, v. 80, p. 114-122, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.051>.

WHITEHEAD, J. Prioritizing sustainability indicators: using materiality analysis to guide sustainability assessment and strategy. **Business Strategy and the Environment**, v. 26, n. 3, p. 399-412, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.1928>.

WOODHOUSE, P.; HOWLETT, D.; RIGBY, D. **Sustainability indicators for natural resource management & policy - Working Paper 2**: a framework for research on sustainability indicators for agriculture and rural livelihoods. [Bradford: Bradford University]; [Manchester: Manchester University]; [Alice: University of Fort Hare], 2000. 39 p. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57a08d70ed915d622c0019c3/2WoodhouseHowlettRigby.pdf>. Acesso em: 11 set. 2023.

XAVIER, A.; FREITAS, M. de B. C.; FRAGOSO, R.; ROSÁRIO, M. do S. A regional composite indicator for analysing agricultural sustainability in Portugal: a goal programming approach. **Ecological Indicators**, v. 89, p. 84-100, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.048>.

YANG, L.; ZHOU, Y.; MENG, B.; LI, H.; ZHAN, J.; XIONG, H.; ZHAO, H.; CONG, W.; WANG, X.; ZHANG, W.; LAKSHMANAN, P.; DENG, Y.; SHI, X.; CHEN, X.; ZHANG, F. Reconciling productivity, profitability and sustainability of small-holder sugarcane farms: a combined life cycle and

data envelopment analysis. **Agricultural Systems**, v. 199, 103392, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103392>.

YANG, S.; MEI, X. A sustainable agricultural development assessment method and a case study in China based on Euclidean distance theory. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 551-555, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.022>.

YU, S.; MU, Y. Sustainable agricultural development assessment: a comprehensive review and bibliometric analysis. **Sustainability**, v. 14, n. 19, 11824, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141911824>.

ZACHARIAS, S. A. S.; CAMARINHA, I. C.; ELIAS, C. **A evolução do índice de sustentabilidade empresarial (ISE B3) e sua aplicabilidade**. [São Paulo]: Bravo GRC & B3, 2023. Disponível em: <https://solutions.bravogrc.com/guia-esg-3>. Acesso em: 6 set. 2023.

ZAHM, F.; UGAGLIA, A. A.; BARBIER, J. M.; CARAYON, D.; DEL'HOMME, B.; GAFSI, M.; GASSELIN, P.; GESTIN, C.; GIRARD, G.; GUICHARD, L.; LOYCE, C.; MANNEVILLE, V.; REDLINGSHÖFER, B.; RODRIGUES, I. Assessing farm sustainability: the IDEA4 method, a conceptual framework combining dimensions and properties of sustainability. **Cahiers Agricultures**, v. 33, 10, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1051/cagri/2024001>.

ZAHM, F.; VIAUX, P.; VILAIN, L.; GIRARDIN, P.; MOUCHET, C. Assessing farm sustainability with the IDEA method: from the concept of agriculture sustainability to case studies on farms. **Sustainable Development**, v. 16, n. 4, p. 271-281, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/sd.380>.

ZANELLA, A.; CAMANHO, A. S.; DIAS, T. G. Undesirable outputs and weighting schemes in composite indicators based on data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 245, n. 2, p. 517-530, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.03.036>.

ZARBÀ, C.; GRAVAGNO, R. M.; CHINNICI, G.; SCUDERI, A. A systematic review of the SAFA framework in the literature: An approach to assess sustainability in agri-food systems. **Cleaner Environmental Systems**, v. 16, 100267, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2025.100267>.

ZHAO, D. Y.; MA, Y. Y.; LIN, H. L. Using the Entropy and TOPSIS models to evaluate sustainable development of islands: a case in China.

Sustainability, v. 14, n. 6, 3707, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14063707>.

ZHOU, H.; YANG, Y.; CHEN, Y.; ZHU, J. Data envelopment analysis application in sustainability: the origins, development and future directions.

European Journal of Operational Research, v. 264, n. 1, p. 1-16, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.023>.

ZHOU, H.; YANG, Y.; CHEN, Y.; ZHU, J. DEA application in sustainability 1996–2019: the origins, development, and future directions. In: CHEN, C.; CHEN, Y.; JAYARAMAN, V. (ed.). **Pursuing sustainability**. [Norwell: Kluwer], 2021. p. 71-109. (International Series in Operations Research & Management Science, 301). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58023-0_4.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. A mathematical programming approach to constructing composite indicators. **Ecological Economics**, v. 62, p. 291-297, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.12.020>.

