UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ

CAMPUS DE TOLEDO

CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO REGIONAL E AGRONEGÓCIO – PGDRA

DOUTORADO

RAIANE BENEVIDES FERREIRA

CRÉDITO E SUSTENTABILIDADE RURAL NO SEMIÁRIDO BAIANO: UMA ANÁLISE EM DOIS ESTÁGIOS

TOLEDO/PR
2025

RAIANE BENEVIDES FERREIRA

CRÉDITO RURAL E SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO BAIANO: UMA ANÁLISE EM DOIS ESTÁGIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio - Doutorado, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/*campus* de Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de "Doutora em Desenvolvimento Regional e Agronegócio".

Área de Concentração: Economia Regional e Sociedade

Orientador: Jefferson Andronio Ramundo Staduto

TOLEDO/PR
2025

RAIANE BENEVIDES FERREIRA

CRÉDITO RURAL E SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO BAIANO: UMA ANÁLISE EM DOIS ESTÁGIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio - Doutorado, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/*campus* de Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de "Doutora em Desenvolvimento Regional e Agronegócio".

Área de Concentração: Economia Regional e Sociedade

Orientador: Jefferson Andronio Ramundo Staduto

BANCA EXAMINADORA

Dr. Jefferson Andronio Ramundo Staduto
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE

Dr. Andreia Zanella
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Dr. Patrícia Verônica Pinheiro Sales Lima
Universidade Federal do Ceará -UFC

Dr. Sandra Regina da Silva Pinela
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Dr. Eliane Pinheiro de Sousa
Universidade Regional do Cariri - URCA

Dr. Mirian Beatriz Schneider
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE

Dr. Valdir Antônio Galante
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE

Dedico esta tese, primeiramente, a Deus, que me conduziu com sua imensa Graça até este momento tão significativo.

À minha família, por estar sempre ao meu lado, apoiando, dando conselhos, inspirando e incentivando.

Ao meu querido marido, companheiro fiel nesta jornada, cuja paciência, presença e apoio constante foram fundamentais neste processo.

Aos amigos e colegas de turma, pela amizade e parceria.

E, com especial gratidão, ao meu orientador, por sua orientação sempre muito generosa, paciente e cheia de grandes ensinamentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me conduzido até este momento tão especial e gratificante. Sem sua graça divina, nada disso seria possível. Posso afirmar, com o coração cheio de amor e gratidão, que tenho Deus presente em todos os instantes da minha vida. Obrigada, meu Deus.

Com profunda gratidão, agradeço à minha mãe, Gercina, que desde sempre incentivou a mim e aos meus irmãos a estudar e ter uma profissão. Mesmo diante de tantas dificuldades, nunca deixou de acreditar que era possível chegar onde quiséssemos, sempre nos encorajando a dar passos cada vez mais longos. E aqui estou: hoje me tornando doutora em Desenvolvimento Regional e Agronegócio, em um estado distante do nosso, mas nunca longe dos nossos sonhos.

Estendo esse agradecimento ao meu amado pai, Aroldo, grande incentivador e fonte de inspiração. Seu trabalho árduo, dedicado a garantir o sustento e o melhor para nossa família, foi a base de tudo isso.

Aos meus irmãos, Daiane e Ricardo, meu carinho e gratidão pelo amor, companheirismo e incentivo constantes. Vocês sempre estiveram presentes e me inspiram a seguir aprendendo e crescendo.

Ao meu esposo Emerson, obrigada pela paciência e apoio incondicional. Foram muitos altos e baixos ao longo do caminho, mas estivemos lado a lado, superando tudo com parceria e amor.

Agradeço ao meu orientador, professor Jefferson Staduto, pela confiança em dividir este trabalho comigo. Sua generosidade, paciência e profundo conhecimento fizeram de cada orientação um verdadeiro aprendizado.

Agradeço também à professora Andreia Zanella, da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo apoio em todo o processo de construção metodológica da tese e cálculo do índice. A professora Andreia Zanella é uma referência em estudos de Análise Envoltória de Dados e, de forma muito gentil e solidária, forneceu todo o suporte de que precisava ao longo do todo o processo.

Sou também grata aos colegas e amigos de turma, que tornaram essa jornada mais leve e significativa ao longo desses quatro anos.

Aos professores e ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio, meu reconhecimento e admiração por todo o conhecimento compartilhado. É uma honra ter aprendido com profissionais tão competentes e comprometidos.

Agradeço, ainda, à CAPES pelo apoio financeiro por meio da bolsa de pesquisa, que foi essencial para a realização desta tese.

A todos vocês, o meu mais sincero **muito obrigada**! Contem sempre comigo.

FERREIRA, R. B. **Crédito rural e sustentabilidade no semiárido baiano: uma análise em dois estágios.** 149 f. 2025. Tese. Doutorado em Desenvolvimento Regional e Agronegócio (PGDRA) – Centro de Ciências Sociais aplicadas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Toledo, 2025.

RESUMO

A sustentabilidade, vista como um grande desafio da humanidade no século XXI, tem como missão promover o crescimento econômico com o menor impacto ambiental possível, garantindo que as gerações futuras também tenham acesso aos mesmos recursos. O que não é uma tarefa fácil, pois a sustentabilidade é um processo contínuo, complexo e multidimensional. Mas é essencial frente a intensificação dos efeitos das mudanças climáticas, que têm gerado grandes perdas econômicas, sociais, humanas, culturais e ambientais. Nesse cenário, o setor agrícola desempenha um papel fundamental, por ser um setor estratégico para o alcance de alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 1, 2 e 10 e, de forma indireta os ODS 8, 13 e 15. Desde a conferência dos Países Baixos sobre Agricultura e Ambiente, convocada pela FAO em 1991, a agricultura sustentável e o desenvolvimento rural tornaram-se prioridades da agenda global de sustentabilidade. Mas, para que a produção agrícola seja de fato sustentável, são necessários investimentos em tecnologias e novas técnicas de produção modernas. Uma ferramenta capaz de auxiliar os produtores rurais nesse processo é a política de crédito rural, considerada estratégica para promover uma agricultura resiliente e sustentável. Ao aliviar as restrições financeiras dos produtores rurais, viabiliza a compra de insumos agrícolas, máquinas e equipamentos e recursos tecnológicos que permitem uma combinação mais eficiente dos recursos. Nessa busca pela promoção da sustentabilidade, os índices compostos ganharam destaque e passaram a ser amplamente utilizados em todo o mundo, como instrumentos de mensuração do nível de sustentabilidade e de orientação para a formulação de políticas públicas. Dessa forma, este estudo tem como objetivo desenvolver um índice composto de sustentabilidade rural para os municípios do semiárido baiano, e verificar se existe associação significativa entre o crédito rural e o índice de sustentabilidade. Para tanto, adotou-se um procedimento em dois estágios. No primeiro estágio, calculou-se o índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano por meio de dois métodos de ponderação: a Análise de Componentes Principais (PCA) e o modelo *Benefit-of-the-Doubt* (BOD) formulado a partir de uma Função de Distância Direcional (DDF). No segundo estágio, utilizou-se modelos de dados censurado, mais especificamente, Regressão Tobit e Linear para analisar o efeito de fatores exógenos sobre o nível de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano. Os resultados obtidos pelo método PCA indicam um baixo nível de sustentabilidade rural no semiárido baiano. O modelo DEA-BOD baseado em função de distância direcional mostrou que os municípios operam, em média, a 78,8% da fronteira de sustentabilidade, evidenciando que o desempenho regional está expressivamente aquém do nível alcançado pelos municípios de referência. Além disso, verificou-se efeito positivo e significativo do crédito rural sobre o índice de sustentabilidade, confirmando a sua relevância como instrumento de fortalecimento do desenvolvimento sustentável no semiárido baiano. Os resultados reforçam a importância do crédito rural como política pública estratégica especialmente para contextos de grande vulnerabilidade socioeconômica e condições climáticas adversas. Nesses locais a política de crédito rural pode viabilizar investimentos em tecnologias adaptadas, manejo sustentável dos recursos naturais, diversificação produtiva e aumento da resiliência das atividades agropecuárias. Deste modo, seria importante a ampliação das políticas de crédito na região, a fim de impulsionar o desempenho dos municípios em termos de sustentabilidade. Esse achado contrasta com evidências observadas em outros contextos regionais, como a Amazônia Legal e o Cerrado, onde estudos indicam que o crédito rural, a

intensificação da atividade agropecuária, a expansão da infraestrutura de transportes e a dinâmica populacional têm sido associados ao avanço do desmatamento e à degradação ambiental. No caso do semiárido baiano, contudo, não se observou relação negativa entre crédito rural e desempenho sustentável, sugerindo que, nesse contexto específico, o crédito pode desempenhar papel indutor de práticas mais sustentáveis, ao invés de atuar como vetor de pressão ambiental.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável; Indicadores Compostos; Componentes Principais; Análise Envoltória de Dados; Tobit.

FERREIRA, R. B. **Credit and Rural sustainability in the bahia semiarid region: a two-stage analysis.** Thesis. Postgraduate Program in Regional Development and Agribusiness, Western Parana State University - UNIOESTE, Campus de Toledo, 2025);

ABSTRACT

Sustainability, seen as a major challenge for humanity in the 21st century, has the mission of promoting economic growth with the least possible environmental impact, ensuring that future generations also have access to the same resources. Which is not an easy task, as sustainability is a continuous, complex and multidimensional process. But it is essential in view of the intensification of the effects of climate change, which have generated major economic, social, human, cultural and environmental losses. In this scenario, the agricultural sector plays a fundamental role, as it is a strategic sector for achieving some of the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDGs 1, 2 and 10 and, indirectly, SDGs 8, 13 and 15. Since the Netherlands Conference on Agriculture and Environment, convened by FAO in 1991, sustainable agriculture and rural development have become priorities on the global sustainability agenda. But, for agricultural production to be truly sustainable, investments in technologies and new modern production techniques are necessary. A tool capable of assisting rural producers in this process is the rural credit policy, considered strategic to promote resilient and sustainable agriculture. By alleviating the financial constraints of rural producers, it enables the purchase of agricultural inputs, machinery and equipment and technological resources that allow a more efficient combination of resources. In this pursuit of promoting sustainability, composite indices have gained prominence and have come to be widely used worldwide, as instruments for measuring the level of sustainability and guiding the formulation of public policies. Thus, this study aims to develop a composite rural sustainability index for the municipalities of the semi-arid region of Bahia, and to verify whether there is a significant association between rural credit and the sustainability index. To this end, a two-stage procedure was adopted. In the first stage, the rural sustainability index of the municipalities of the semi-arid region of Bahia was calculated through two weighting methods: Principal Component Analysis (PCA) and the Benefit-of-the-Doubt (BOD) model formulated from a Directional Distance Function (DDF). In the second stage, censored data models were used, more specifically, Tobit and Linear Regression to analyze the effect of exogenous factors on the level of rural sustainability of the municipalities of the semi-arid region of Bahia. The results obtained by the PCA method indicate a low level of rural sustainability in the semi-arid region of Bahia. The DEA-BOD model based on a directional distance function showed that the municipalities operate, on average, at 78.8% of the sustainability frontier, evidencing that the regional performance is significantly below the level achieved by the reference municipalities. In addition, a positive and significant effect of rural credit on the sustainability index was verified, confirming its relevance as an instrument for strengthening sustainable development in the semi-arid region of Bahia. The results reinforce the importance of rural credit as a strategic public policy especially for contexts of great socioeconomic vulnerability and adverse climatic conditions. In these locations the rural credit policy can enable investments in adapted technologies, sustainable management of natural resources, productive diversification and increased resilience of agricultural activities. Thus, it would be important to expand credit policies in the region, in order to boost the performance of municipalities in terms of sustainability. This finding contrasts with evidence observed in other regional contexts, such as the Legal Amazon and the Cerrado, where studies indicate that rural credit, the intensification of agricultural activity, the expansion of transport infrastructure and population dynamics have

been associated with the advance of deforestation and environmental degradation. In the case of the semi-arid region of Bahia, however, no negative relationship was observed between rural credit and sustainable performance, suggesting that, in this specific context, credit may play an inducing role of more sustainable practices, instead of acting as a vector of environmental pressure.

Keywords: Sustainable Development; Composite Indicators; Principal Components; Data Envelopment Analysis; Tobit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tripé da sustentabilidade 31
Figura 2: Localização geográfica do semiárido baiano, 2023 47
Figura 3: Representação dos modelos CCR e BCC 68
Figura 4: Representação dos modelos DEA-BOD 71
Figura 5: Influência de variáveis exógenas 81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Modelo DEA-BOD de distância direcional com fator desejável e indesejável 77
Gráfico 2: Distribuição dos municípios conforme o índice de sustentabilidade 91
Gráfico 3: Distribuição dos municípios conforme o índice de sustentabilidade – modelo DEA-BOD de distância direcional com restrição de pesos 98
Gráfico 4: Contribuição dos indicadores para o índice de desenvolvimento rural sustentável do município de Paulo Afonso 109
Gráfico 5: Contribuição dos indicadores para o índice de desenvolvimento rural sustentável do município de Feira de Santana 110
Gráfico 6: Contribuição dos indicadores para o índice de desenvolvimento rural sustentável do município de Vitória da Conquista 111
Gráfico 7: Contribuição dos indicadores para o índice de desenvolvimento rural sustentável do município de Jequié 112

LISTA DE MAPAS

Mapa 1: Distribuição espacial do índice de sustentabilidade rural dos munícipios do semiárido baiano 92

Mapa 2: Distribuição espacial do índice de sustentabilidade dos municípios do semiárido baiano 95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Indicadores de sustentabilidade: descrição e significado 53
Quadro 2: Descrição das vantagens e desvantagens do modelo PCA 59
Quadro 3: Descrição das variáveis exógenas 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estatística descritiva das variáveis 85
Tabela 2: Valores das raízes características e percentual de variância total explicada 87
Tabela 3: Cargas fatoriais após a rotação ortogonal dos fatores 89
Tabela 4: Ranking dos vinte municípios que apresentaram os maiores e menores índice de sustentabilidade na região do semiárido baiano, 2020 93
Tabela 5: Lista dos vinte municípios com pior desempenho no modelo DEA-BOD sem restrição de pesos 97
Tabela 6: Ranking dos municípios que atingiram a maior e a menor pontuação no índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano 99
Tabela 7: Desempenho do município de Paulo Afonso no índice de sustentabilidade rural (DEA-BOD = 0,73) 103
Tabela 8: Desempenho do município de Feira de Santana no índice de sustentabilidade rural (DEA-BOD = 0,87) 105
Tabela 9: Desempenho do município de Jequié no índice de sustentabilidade rural (DEA-BOD = 0,92) 106
Tabela 10: Desempenho do município de Vitória da Conquista no índice de sustentabilidade rural (DEA-BOD = 0,92) 107
Tabela 11: Estatísticas descritivas dos índices compostos de sustentabilidade dos estabelecimentos rurais dos municípios do semiárido baiano 113
Tabela 12: Correlação de Spearman 114
Tabela 13: Correlação de Kendall 115
Tabela 14: Resultados do modelo de regressão MQO 116
Tabela 15: Resultados do modelo de regressão Tobit 117

Tabela 16: Efeitos marginais do modelo de regressão Tobit 120

LISTA DE SIGLAS

BOD	Benefício da Dúvida
CEPAL	Comissão Econômica para a América Latina e Caribe
DDF	Função de Distância Direcional
DEA	Análise Envoltória de Dados
DEA-BOD	Modelo benefício da dúvida
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
PCA	Análise de Componentes Principais
PIB	Produto Interno Bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
UNCED	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

2. REVISÃO TEÓRICA E EMPÍRICA 19

2.1. Breve descrição sobre as abordagens do desenvolvimento econômico: origem do conceito 19

2.2. Entendendo o rural: uma análise conceitual 22

2.3. Desenvolvimento e Meio Ambiente: a origem do conceito de desenvolvimento sustentável 26

2.4 Sustentabilidade agrícola: uma análise conceitual 29

2.5 Índices de sustentabilidade recentes: uma revisão empírica 32

2.5.1 Revisão Empírica de Índice de Sustentabilidade 34

2.6 Crédito rural e o seu papel na promoção da sustentabilidade 40

3. METODOLOGIA 46

3.1 Área de estudo 47

3.2. Cálculo do Índice Composto de Sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano 49

3.2.1. Etapas da construção do índice composto 49

3.3 Seleção de Indicadores de Sustentabilidade 52

3.4 Métodos de ponderação e agregação adotados no cálculo de índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano 55

3.4.1 Análise de Componentes Principais (PCA) 56

3.4.2 Descrição do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA) tradicional 62

3.4.3 Especificação do modelo *Benefit-of-the-Doubt* (DEA-BOD) tradicional 68

3.4.4 Modelo *Benefit-of-the-Doubt* adaptado a Função de Distância Direcional incluindo fatores indesejáveis e restrições de pesos (DEA-BOD de distância direcional) 74

3.5 Correlação de Spearman e Kendall 79

3.6 Análise da influência de fatores exógenos no índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano 80

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 85

4.1 Análise descritiva das variáveis 85

4.2 Índices de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano 87

4.2.1 Indicador construído a partir da Análise de Componentes Principais (PCA) 87

4.2.2 Indicador construído a partir do modelo *Benefit-of-the-Doubt* adaptado a Função de Distância Direcional (DEA-BOD de distância direcional) 94

4.3. Análise comparativa dos índices compostos calculados 112

4.4. Análise dos efeitos de fatores exógenos no índice de sustentabilidade 115
CONSIDERAÇÕES FINAIS 122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 127
ANEXOS 143

1. INTRODUÇÃO

O setor agrícola é fundamental para a economia mundial, pois, além de garantir a segurança alimentar, é uma importante fonte de geração de emprego e renda para as famílias (Hu *et al*., 2022). Em países em desenvolvimento como o Brasil, a relevância desse setor para a economia é ainda maior. Dados do Censo Agropecuário mostram que cerca de 15% da população brasileira vive em áreas rurais e dependem da atividade agrícola para garantirem a sua sobrevivência (IBGE/SIDRA, 2017), sendo uma importante fonte de geração de emprego e renda para as famílias brasileiras. Em 2021, o agronegócio representava 24,8% do PIB brasileiro (CEPEA/USP, 2022) e empregava cerca de 15,1 milhões de pessoas em estabelecimentos rurais (Censo Agropecuário, 2017). Além disso, o Brasil é um dos principais produtores mundiais de *commodities* e é um importante ator no sistema alimentar global (CEPEA/USP, 2022).

Por outro lado, o setor agrícola é uma importante fonte de emissão de gases do efeito estufa, dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) mostram que a agricultura é responsável por 11% das emissões globais de dióxido de carbono (CO2), 47% de metano (CH4) e 58% de óxido nitroso (N2O). No Brasil, estimativas Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (2020) mostram que a agropecuária e as mudanças de uso da terra e nas florestas são responsáveis por cerca de 74% das emissões brutas de gases do efeito estufa.

O Brasil, assim como outros países, tem firmado compromissos voluntários de reduzir as emissões de CO2 para frear os avanços dos efeitos das mudanças climáticas e reduzir o impacto ambiental da atividade produtiva. Durante a COP 29 (Conferência das Partes) o governo brasileiro anunciou o compromisso de reduzir suas emissões líquidas de gases de efeito estufa entre 59% e 67% em 2035, na comparação com os níveis de 2005. Isso equivale, em termos absolutos, reduzir as emissões entre 850 milhões e 1,05 bilhão de toneladas de gás carbônico equivalente em 2035 (Brasil, 2024).

Como destacado por Agovino *et al.* (2019), embora seja um importante emissor de gases de efeito estufa, o setor agrícola também possui um grande potencial de sequestro de carbono, o que pode contribuir para a redução das emissões totais gases do efeito estufa, tão importante para a transição para um modelo de produção mais sustentável. Contudo, aproveitar esse

potencial do setor agrícola depende diretamente do tipo de prática agrícola que se adota na produção.

Deste modo, tendo em vista a importância do setor agrícola e a necessidade de reduzir as emissões de gases do efeito estufa, é preciso buscar estratégias para aumentar os níveis de sustentabilidade, incentivando ações de mitigação dos impactos ambientais, especialmente nas áreas rurais para garantir o uso adequado dos recursos naturais e o bem-estar social e econômico. A produção sustentável possibilita que a atividade agrícola seja realizada de forma equilibrada e consciente, considerando não apenas as necessidades das gerações atuais, mas também as das futuras gerações. Mais do que cumprir compromissos ambientais, trata-se de garantir estabilidade econômica, segurança alimentar e qualidade de vida para milhões de pessoas que dependem da agricultura.

Neste contexto, a política de crédito rural pode surgir como uma ferramenta estratégica para promover uma agricultura resiliente e sustentável. A redução das restrições financeiras dos produtores rurais, pela disponibilidade de crédito, viabiliza a compra de insumos agrícolas produtivos, como agroquímicos, sementes melhores, contratação de mão de obra, máquinas e equipamentos, insumos tecnológicos e a aquisição de técnicas de baixo impacto ambiental, permitindo uma combinação mais eficiente dos recursos naturais (Ogundeji *et al*., 2018).

Adicionalmente, o crédito rural proporciona suporte para enfrentar incertezas climáticas, flutuações de preços e crises que possam afetar o setor (Souza; Herschmann; Assunção, 2020). A restrição de crédito rural em ambientes sensíveis e severos como o semiárido brasileiro pode conduzir os agricultores ao uso exaustivo dos recursos naturais sem que haja adequada reposição ao manejo. No contexto de mudanças climáticas o crédito rural é também importante instrumento de mitigação dos seus efeitos sob a produção agrícola e renda das famílias rurais, consequentemente, do seu bem-estar.

Desta forma, a política de crédito rural pode ser uma importante aliada na promoção da sustentabilidade rural, favorecendo a adoção de práticas agrícolas sustentáveis e de baixo impacto ambiental. Neste sentido, o objetivo desse estudo é desenvolver um índice composto para mensurar o nível de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano, e verificar se o crédito rural, entre outros fatores exógenos, influencia o índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano.

De modo específico, este estudo tem como objetivos:

1. Aplicar o modelo de Análise de Componentes Principais (PCA) para calcular o índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano;

2. Aplicar o modelo do *Benefit-of-the-Doubt* (BOD) formulado a partir de uma Função de Distância Direcional (DDF) para avaliar o desempenho dos municípios do semiárido baiano em relação à sustentabilidade;

3. Comparar os resultados dos modelos de Análise de Componentes Principais e do *Benefit-of-the-Doubt*;

4. Analisar a influência do crédito rural o índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano por meio do método de análise de regressão Tobit.

Dispor de um índice composto que avalie o nível de sustentabilidade rural é fundamental para monitorar e formar bases de informação que auxiliem formuladores de políticas públicas no processo de tomada de decisão, bem como para acompanhar a evolução das economias em direção ao desenvolvimento sustentável (Fusco, 2023). Com os índices é possível sintetizar uma série de informações quantitativas em um único número, de forma simples e com fácil interpretação. E, assim, é possível avaliar fenômenos complexos, como a sustentabilidade, fornecendo uma medida comparável entre diferentes regiões, países ou áreas Pereira, Sauer e Fagundes (2016).

A importância de se ter índices compostos para avaliar a sustentabilidade já tinha sido destacada na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), realizada no Rio de Janeiro em 1992, a Rio 92, que convocou os países, bem como organizações governamentais e não governamentais, para desenvolverem índices compostos que mensurassem o desenvolvimento sustentável, a fim de melhorar a base de informações para a tomada de decisões sobre sustentabilidade. Desde então, uma infinidade de índices compostos foi desenvolvida em todo o mundo para medir a sustentabilidade e outros aspectos. Atualmente tais índices são amplamente utilizados em diferentes áreas de pesquisa (López-Penabad; Iglesias-Casal; Rey-Ares, 2022; Mariano, Ferraz e Gobbo, 2021; Fernández-Martínez *et al*., 2020; D'Inverno De Witte, 2020; Lavigne *et. al,* 2019; Abreu; Nunes; Mesias, 2019; Tsaples *et al*., 2019; Ervural; Zaim; Delen, 2018; Rogge; Jaeger; Lavigne, 2017; Zanella; Camanho; Dias, 2015; Morais e Camanho, 2011).

Para atingir o objetivo proposto, adotou-se dois métodos de ponderação reconhecidos na literatura para a elaboração de índices compostos: o modelo *Benefit-of-the-Doubt* (BOD) formulado a partir de uma Função de Distância Direcional (DDF) e a Análise de Componentes Principais (PCA). Os dois métodos serão detalhados ao longo deste estudo, destacando as suas limitações e vantagens para mensurar fenômenos multidimensionais, bem como as adaptações destes modelos para a construção de índices.

É importante ressaltar a originalidade desta pesquisa no que diz respeito à análise da sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano, tanto pela combinação de duas técnicas consolidadas na análise de indicadores: a Análise de Componentes Principais (PCA) e o modelo *Benefit-of-the-Doubt* (BOD) formulado a partir de uma Função de Distância Direcional (DDF), quanto pela possibilidade de considerar simultaneamente fatores desejáveis e indesejáveis na avaliação da sustentabilidade, e, isso, sem a necessidade de ajustes prévios nas escalas de medida dos indicadores individuais. Isso foi possível por meio da aplicação da Função DDF ao modelo BOD, técnica amplamente utilizado na avaliação de desempenho em diferentes áreas de pesquisa (Mergoni; D'Inverno; Carosi, 2022, Zanella; Camanho; Dias, 2015, Calabria; Camanho e Zanella, 2018, Rogge; Jaeger; Lavigne, 2017, Lavigne; Jaeger e Rogge, 2019, Oliveira; Zanella; Camanho, 2020).

Espera-se com este estudo contribuir para a literatura, incorporando à análise da sustentabilidade rural o modelo BOD formulado a partir da função DDF, explorando as vantagens de ambos os métodos propostos. Sobretudo, esse estudo é uma contribuição para analisar e compreender os mecanismos e canais para aumentar os níveis de sustentabilidade nos municípios do semiárido baiano, bem como o papel do crédito rural.

Na revisão de literatura, não foi identificado nenhum estudo que tenha utilizado o modelo BOD formulado a partir da função DDF para criar um índice de sustentabilidade rural no contexto dos municípios do semiárido baiano. Adicionalmente, para o mesmo conjunto de indicadores foi aplicado a análise PCA. Desta forma, obteve-se dois resultados por meio da aplicação desses métodos, e, assim, pode-se comparar e aprimorar a atribuição de peso aos indicadores das dimensões sociais, econômicas e ambientais, que é um dos principais desafios dos modelos convencionais. No modelo do BOD formulado a partir da função DDF os pesos são definidos de forma endógena, atribuindo aos indicadores de desempenho de cada unidade em avaliação o peso mais favorável possível, valorizando as especialidades de cada unidade.

Com esse modelo é possível inferir a importância relativa de cada indicador básico e de cada dimensão sustentável na obtenção da sustentabilidade sem depender de opiniões subjetivas.

Além disso, o modelo BOD formulado a partir da função DDF permite a utilização de variáveis desejáveis, como o valor da produção por pessoa ocupada, a adoção de práticas sustentáveis, a proporção de áreas de matas e floresta, e indesejáveis, como as emissões de CO2 e o desmatamento, no cálculo do índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano (Vidoli *et al.,* 2024). Deste modo, mensurar um índice composto de sustentabilidade rural que considere simultaneamente fatores desejáveis e indesejáveis é fundamental para medir as pressões exercidas pela atividade econômica sob o meio ambiente, especialmente em um contexto em que as mudanças climáticas têm impactado significativamente a economia e a vida das pessoas.

Este estudo foi estruturado em cinco capítulos. O primeiro corresponde a esta breve introdução. O segundo a uma revisão teórica e empírica sobre o desenvolvimento sustentável e o processo de construção desse conceito, e em seguida é apresentada uma breve discussão sobre o rural e o papel do crédito na promoção da sustentabilidade. E ao final do capítulo, é apresentada uma síntese empírica dos estudos mais recentes sobre sustentabilidade, destacando os métodos aplicados e as variáveis utilizadas no cálculo do índice, tanto em nível nacional quanto internacional. O terceiro capítulo corresponde a metodologia adotada neste estudo, onde são apresentados os métodos adotados e o passo a passo da construção do índice de sustentabilidade dos municípios do semiárido baiano, além da apresentação das variáveis utilizadas. O quarto corresponde a discussão dos resultados alcançados. Por fim, o quinto capítulo reúne as considerações finais.

2. REVISÃO TEÓRICA E EMPÍRICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar um arcabouço teórico e empírico sobre o conceito de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, trazendo a importância de conservar os recursos naturais para garantir o bem-estar das gerações futuras e a sustentabilidade produtiva das economias.

2.1. Breve descrição sobre as abordagens do desenvolvimento econômico: origem do conceito

Por muito tempo o conceito de desenvolvimento esteve associado exclusivamente à visão de crescimento econômico, ou seja, ao aumento da produção, considerada condição necessária e suficiente para o desenvolvimento. O crescimento era medido pela variação do PIB *per capita* (Produto Interno Bruto). Deste modo, apoiado em ideias liberais e no poder autorregulador do mercado, o desenvolvimento era compreendido como melhorias econômicas alcançadas pelo progresso tecnológico e pela acumulação de capital.

Essa visão persistiu até o fim da Segunda Guerra Mundial, quando surgiram as primeiras abordagens do desenvolvimento desvinculadas do conceito de crescimento econômico, tendo como base questões sociais e distributivas (Carvalho; Cardoso; Frota, 2022). Para os defensores desta nova abordagem, o crescimento econômico é importante e indispensável, mas não é condição suficiente. O desenvolvimento requer mudanças estruturais que o simples crescimento da renda não é capaz de garantir.

Segundo Carvalho, Cardoso e Frota (2022, p.157), essa nova visão sobre o desenvolvimento nasce no campo da economia como um "produto do seu tempo", motivadas pelas condições sociais e econômicas da época, como as flutuações econômicas do século XIX, a concentração de renda e a grande disparidade entre os países ricos e pobres, que contribuíram para o nascimento desse novo campo de pesquisa na economia. Os problemas econômicos, sociais e a pobreza advindas da época aguçaram o debate sobre a necessidade de se distinguir crescimento de desenvolvimento econômico, em vez de tratá-los como sinônimos e, assim, buscar alternativas para estimular o desenvolvimento e reduzir as disparidades entre os países ricos e pobres.

O economista austríaco Joseph Schumpeter (1911) foi o primeiro a distinguir crescimento de desenvolvimento econômico. Antes mesmo do nascimento das abordagens do

desenvolvimento, em sua principal obra: *Teoria do Desenvolvimento Econômico* (1911), o autor tratava o desenvolvimento como uma situação de descontinuidade e ruptura que altera o equilíbrio e se apresenta na esfera industrial e comercial. Nas palavras do próprio Schumpeter (1997, p.75), "o desenvolvimento é uma mudança espontânea e descontínua nos canais do fluxo circular, que altera e desloca para sempre o estado de equilíbrio previamente existente".

Para Schumpeter (1911) as inovações tecnológicas são os motores da mudança no fluxo circular da renda que altera para sempre o equilíbrio. Para esse autor, o desenvolvimento surge a partir das inovações. Essas inovações podem ser: a introdução de um novo bem; de um novo método de produção; a abertura de um novo mercado; a conquista de uma nova fonte de matéria-prima e a conquista de uma nova organização de qualquer indústria. Elas são introduzidas na economia pelos empresários inovadores, agentes cruciais para alcançar o desenvolvimento, pois são eles que adotam novas combinações produtivas.

Posteriormente, outras vertentes de pensamento, como a estruturalista associada à CEPAL (Comissão Econômica para a América Latina e Caribe), bem como as teorias do crescimento equilibrado e desequilibrado, abordaram o desenvolvimento econômico sob diferentes perspectivas. Para essas teorias, o desenvolvimento deriva de mudanças qualitativas no padrão de vida das pessoas, nas instituições e nas estruturas produtivas.

Para os economistas cepalinos, a industrialização seria a única forma de desenvolver os países periféricos, e tirá-los do subdesenvolvimento. O Estado era visto como o meio mais eficaz para a concretização deste fenômeno. Para eles, a divisão internacional do trabalho nos moldes existentes não permitia que os países subdesenvolvidos alcançassem o desenvolvimento. Pelo contrário, a manutenção da especialização produtiva nas economias latino-americanas, conforme proposto pela teoria das vantagens comparativas de David Ricardo, levaria a um aumento das disparidades entre as economias subdesenvolvidas e desenvolvidas, devido à progressiva deterioração dos termos de trocas.

Segundo Prebisch (1957) a industrialização da América Latina poderia ser alcançada por meio da substituição de importações, ou seja, produzindo internamente os bens que antes eram importados dos países desenvolvidos. Conforme Souza (2005), essa estratégia representava uma alternativa para estimular o crescimento econômico e a adoção de novas tecnologias. Isso permitiria a diversificação da base industrial e a própria economia produziria novas formas de especialização, ou seja, novas vantagens comparativas, ampliando a sua base exportadora. À medida que as indústrias ganhassem maturidade, a abertura do mercado a novos

produtos contribuiria para diversificar ainda mais a oferta de bens, ampliando o bem-estar da população.

Já Furtado (1986), um economista brasileiro vinculado à mesma corrente de pensamento, mostrou que o desenvolvimento abrange o crescimento econômico, superando-o, ou seja, o desenvolvimento vai além do simples crescimento da economia, pois ele envolve mudanças estruturais e qualitativas como melhorias na educação, saúde, qualidade de vida, meio ambiente e na renda. Para Furtado (1986), o crescimento, embora seja fundamental para o bom desempenho de qualquer economia, não é condição suficiente para mensurar o bem-estar de uma população. Segundo ele, o Brasil durante os anos de 1950 e 1960 foi um exemplo disso. Neste período, o país vivenciou altas taxas de crescimento econômico impulsionadas por um rápido processo de industrialização. No entanto, este crescimento não se traduziu em um desenvolvimento econômico significativo, pois não se observavam melhorias na qualidade de vida das pessoas, a desigualdade ainda era crescente e os salários reais não sofriam nenhum efeito positivo frente ao crescimento econômico. Mostrando que o desenvolvimento vai além do simples aumento do produto *per capita*.

Em uma abordagem mais contemporânea, desenvolvida pelo economista indiano Amartya Sen, um dos principais formuladores do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e vencedor do prêmio Nobel de Economia em 1998, o desenvolvimento transcende a perspectiva econômica. Para Sen (2000) o desenvolvimento implica em libertar as pessoas de suas privações, sejam elas econômicas, sociais, políticas ou culturais. Para ele, o desenvolvimento se caracteriza pela liberdade de escolher entre diversas oportunidades aquela que lhe permita alcançar os objetivos que almeja. Ou seja, o desenvolvimento é o estágio no qual são removidas as privações que restringem a livre escolha dos indivíduos. Neste caso, desvia-se o foco dos fatores estritamente econômicos para enfatizar os valores e as concepções de vida das pessoas, bem como as questões pertinentes ao contexto em que elas vivem, como os riscos e incertezas. Afinal, as pessoas são o objetivo último do desenvolvimento, e a prosperidade econômica é apenas um meio para alcançá-lo.

Neste processo de construção do conceito de desenvolvimento, abordagens mais recentes têm incorporado ao conceito de desenvolvimento a necessidade de preservar os recursos naturais, para que as gerações futuras também tenham a oportunidade de usufruir dos mesmos recursos naturais.

Essa necessidade de preservar os recursos naturais consolidou-se como uma agenda global na década de 1970, com a publicação do relatório do Clube de Roma em 1972, intitulado *The limits to growth*. Nesse relatório, foram apresentados os riscos e limites do crescimento econômico desordenado. Nele foi sugerido que, se forem mantidos os níveis de crescimento econômico e demográfico observados, em um prazo relativamente curto, seriam alcançados os limites de crescimento do planeta. Isso teria consequências danosas para a comunidade mundial, como aumento do desemprego, redução da produção de alimentos, prejuízos econômicos e sociais e níveis inaceitáveis de degradação ambiental. Só seriam evitados se houvesse mudanças significativas na forma da produção (Mueller, 1998; Barbieri, 2020).

E, assim, pós a década de 1970, as questões ambientais e os recursos naturais passaram a ser tratados como questões prioritárias na literatura econômica, entrando na agenda de políticas públicas (Fernandez, 2011), dando início a uma série de conferências e debates que buscavam inserir as variáveis ambientais na política de desenvolvimento, a exemplo do Clube de Roma (1972), da Conferência de Estocolmo (1972) e da Conferência das Nações Unidas sobre o Comércio e o Desenvolvimento (1974). Nestes encontros, discutiram-se as consequências ambientais do modelo tradicional de desenvolvimento, mostrando que existem limites naturais para o crescimento econômico e que era preciso buscar novas formas de crescimento.

Neste contexto, surge o termo "desenvolvimento sustentável", que será detalhado na seção 2.3, como uma alternativa ao modelo tradicional que priorizava o crescimento econômico em detrimento das questões ambientais, levando a sociedade a refletir sobre o futuro do planeta. Esse momento marcou o despertar de uma consciência ambiental, foi o início de um processo de reavaliação crítica das relações entre a economia, a sociedade e o meio ambiente. Representou a introdução de um novo paradigma na sociedade, rompendo com a visão mecanicista e antropocêntrica em favor de uma abordagem mais holista e ecológica, buscando um equilíbrio entre o homem e a natureza (Silva, 2003).

2.2. Entendendo o rural: uma análise conceitual

Antes de tratar sobre a sustentabilidade rural, é importante entender o que é o *rural* e quais são as suas características. Quando se fala em *rural* vem logo à mente a ideia de um local onde são desenvolvidas atividades agrícolas e pecuárias (Williams, 2011), é o que comumente se chama de o *mundo não-urbano*. Essa dicotomia entre o que é o *rural* é o que é *urbano* tem

raízes na sociedade moderna que consolidou as cidades como lugar de “progresso”, “industrial”. E o rural era o oposto disso, era o lugar onde são desenvolvidas atividades não tecnológicas.

Até o início do século XX a agricultura era de fato a principal atividade desenvolvida no campo e, portanto, era o principal meio de subsistência da população rural. Nesta época, o rural era visto numa perspectiva puramente agrícola, com pouca atenção às questões sociais ou com o desenvolvimento de outras atividades (Abreu; Nunes; Mesias, 2019).

A partir de meados da década de 1980, as áreas rurais passaram por profundas transformações, deixando de ser uma economia estritamente agrícola e de subsistência para se tornar uma economia de serviços. Conforme Graziano da Silva, Del Grossi e Campanhola (2002), esse “novo rural” que se consolida pós década de 1980 tem como base uma agropecuária moderna e intimamente ligada à agroindústria com a produção de *commodities* em larga escala, e as atividades não-agrícolas, ligadas a atividades de lazer, turismo, prestação de serviços e moradia.

Como destacado por Graziano da Silva, Del Grossi e Campanhola (2002), essas atividades, que já existiam em pequena escala, se tornaram alternativas de emprego e renda no meio rural integrando as grandes cadeias produtivas. Com a chegada da tecnologia e das máquinas no campo expandiu-se a produtividade das lavouras e simplificando as atividades agrícolas, o que reduziu a necessidade de grandes contingentes de mão-de-obra. Deste modo, atividades que outrora demandavam uma grande quantidade de pessoas para dar conta das atividades, com as máquinas necessita-se cada vez menos. E esse excedente de pessoas foram migrando para atividades não-agrícolas. Com isso, a modernização da agricultura e o deslocamento de plantas industriais para as áreas rurais transformaram significativamente a estrutura produtiva rural, diminuindo as diferenças entre o campo e a cidade (Ferreira, Branchi e Oliveira, 2024).

De modo que o rural não pode mais ser associado a uma atividade meramente agrícola (Ferreira, Branchi e Oliveira, 2024). Novas dinâmicas, elementos e atores sociais passam a integrar o “novo rural” (Lobão; Staduto, 2018). A agricultura deixa de ser a atividade exclusiva nas áreas rurais e outras atividades não agrícolas passam a integrar as áreas rurais gerando novas fontes de riqueza para as famílias, e essas atividades respondem cada vez mais pela nova dinâmica do rural brasileiro, a agropecuária não mais responde pela maior parte da renda da população rural (Graziano da Silva, 2002).

Graziano da Silva, Del Grossi e Campanhola (2002), destacam o crescimento das construções, o rural também como um espaço de moradia e lazer, seja para a classe média ou para a população de baixa renda, revelando uma de suas novas funções, que se tornam fonte de captação de mão-de-obra.

O "novo rural" é, passa a ser uma extensão do urbano, e se consolida após a década de 1990, englobando diferentes atividades, atores e paisagens, dando fim à dicotomia entre o rural o urbano, introduzindo a ideia de um *continuum* entre eles. E, assim, o debate sobre a ruralidade passa a incorporar aspectos que vão além do estritamente agrícola, como a preservação do meio ambiente e da paisagem local, dos traços culturais e a geração de empregos não agrícolas (Kühn, 2015).

De acordo com Renzi e Piacenti (2022), essa visão de um *continuum* rural-urbano diz respeito à ideia de que existe uma contiguidade entre as áreas rurais e urbanas, dificultando uma clara demarcação desses locais. Em outras palavras, esses espaços estão de alguma forma sobrepostos e entrelaçados. Segundo eles, as áreas rurais e urbanas estão interligadas por meio de relações econômicas multisetoriais (agricultura, turismo, tecnologia, comunicação, energia) e multiagentes (público e privado).

Assim, o "novo rural" se consolida como um conceito de natureza territorial, fundamentado em costumes, tradições e na diversidade de modos de vida e não apenas no aspecto setorial. Tem como característica a existência de famílias pluriativas que combinam atividades agrícolas e não agrícolas, e que promovem a integração setorial e espacial. Isso, fruto das mudanças nos postos de trabalho introduzidas pela modernização da produção agrícola, que dinamizou a base técnica de produção no campo, mobilizando as famílias rurais a reorganizarem as formas de ocupação da força de trabalho e a buscar outras atividades não agrícolas para garantir o seu sustento. A medida que aumenta a renda agrícola e as poupanças rurais ocorrem novos investimentos em atividades não agrícolas (Mayer; Habersetzer; Meili, 2016).

Nesse cenário, o rural deixa de ser visto apenas pelo aspecto setorial e passa a agregar a estrutura social, econômica e ambiental do meio rural (Lobão; Staduto, 2018). Segundo Souza (2019), esse novo olhar sobre o rural também modificou a visão sobre o "desenvolvimento rural", que passou a incorporar novas variáveis, cujo objetivo final é melhorar o bem-estar das famílias rurais. Nesta perspectiva, Ellis e Biggs (2001), definem o desenvolvimento rural como um conjunto de ações e práticas destinadas a reduzir pobreza das áreas rurais e melhorar a

qualidade de vida das pessoas, possibilitando a elas a capacidade de controlar e definir as suas prioridades para realizar as mudanças que desejarem.

Nesta linha, Fernández-Martínez *et al*. (2020) definem o desenvolvimento rural como um conjunto de atividades e ações realizadas por indivíduos, organizações e grupos que, em conjunto, conseguem desenvolver as áreas rurais. Neste sentido, o desenvolvimento rural é uma combinação de aspectos econômicos e sociais, e a sua trajetória perpassa uma diversificação das atividades econômicas. Além dessa diversificação de atividades, o desenvolvimento rural é caracterizado por ser multissetorial e multifuncional, englobando múltiplas dimensões: econômica, sociocultural, político-institucional e ambiental (Kageyama, 2008).

Deste modo, a função produtiva, que antes se limitava à atividade agrícola, agora agrega outras atividades, como o turismo rural, artesanato, processamento de produtos e serviços. Conforme López-Penabad, Iglesias-Casal e Rey-Ares (2022), o conceito de desenvolvimento rural, como um conjunto de atividades e ações de diversos atores que, em conjunto, levam ao progresso nas áreas rurais, evoluiu ao longo do tempo em resposta ao desenvolvimento e à implementação do conceito de sustentabilidade. Junto com ele, mudou-se o foco das políticas de promoção do desenvolvimento rural, migrando de uma abordagem inicialmente setorial para uma abordagem multisetorial, na qual o meio ambiente também se torna uma preocupação central.

Essa preocupação com as questões ambientais nasceu em meio a um cenário de degradação ambiental provocada pelo consumo exacerbado. Essa nova maneira de ver o desenvolvimento ampliou a sua definição ao incorporar a preocupação com a preservação ambiental. Além das melhorias econômicas e sociais, defende-se a necessidade de incorporar às políticas de desenvolvimento a proteção ao meio ambiente como forma de assegurar que as gerações futuras também tenham acesso aos mesmos recursos naturais.

Assim, o reconhecimento de que o meio ambiente é primordial e que é preciso cuidar dos recursos para que ele não venha a faltar no futuro se tornou premissa fundamental do desenvolvimento e das políticas públicas. Assim como, preserva os ecossistemas para que eles continuem prestando serviços ambientais.

2.3. Desenvolvimento e Meio Ambiente: a origem do conceito de desenvolvimento sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável surge na década de 1980 e é definido pela Comissão de Desenvolvimento e Meio Ambiente das Nações Unidas como: "aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades" (WCED, 1987, p. 40). Em outras palavras, o desenvolvimento sustentável é o estágio em que as gerações presentes conseguem atender as suas necessidades básicas[1] sem prejudicar as gerações futuras, garantindo que elas também tenham acesso aos mesmos recursos, dando início a uma visão de desenvolvimento como um padrão de crescimento ecologicamente correto, economicamente viável e socialmente aceitável. Que busca a construção de alternativas que equilibrem as metas de crescimento com a preservação ambiental, pois o crescimento é importante, mas como afirmou Sachs (2009) ele precisa ser socialmente justo e ambientalmente sustentável, evitando que a exaustão dos recursos naturais e o aumento da poluição comprometam a qualidade de vida das pessoas. Conforme Barbieri (2020, p.46), "o desenvolvimento não se mantém se a base de recursos se deteriora, e o meio ambiente não pode ser protegido se o crescimento não levar em conta as consequências da sua destruição".

Com isso, uma série de conferências e debates foram realizados nos níveis local, nacional e global na tentativa de abordar diferentes aspectos dos desafios da sustentabilidade e inserir na política de desenvolvimento as variáveis ambientais. A exemplo da Rio 92 - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, no Rio de Janeiro; a Rio+10 em 2002, em Joanesburgo; e a Rio+20 em 2012, pela segunda vez no Rio de Janeiro.

Foi durante a Rio 92 que as questões ambientais foram oficialmente institucionalizadas (Nobre, 2002). Como resultado, foi produzido um documento denominado "Agenda 21", no qual foram estabelecidas as bases necessárias para atingir o desenvolvimento sustentável. Nesse documento, foram definidos os direitos e as obrigações individuais e coletivas para conciliar o meio ambiente e o desenvolvimento, onde foram firmados compromissos políticos de cooperação entre as nações.

[1] Para a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), as necessidades básicas são: emprego, alimentação, energia, habitação, abastecimento de água potável, saneamento, serviços médicos e educação (Barbieri, 2020).

Na Rio 92 foi reconhecida a necessidade e o direito da geração atual se desenvolver, mas também foi enfatizado a responsabilidade que a geração atual tem de salvaguardar o meio ambiente e os recursos naturais para garantir que as gerações futuras também possam usufruir dos mesmos recursos. Desde então, o desenvolvimento sustentável como um assunto se popularizou em todo o mundo (Kwatra; Kumar; Sharma, 2020).

Na Rio+20 as nações se reúnem mais uma vez para renovar e reafirmar os compromissos com as metas para o desenvolvimento sustentável e, em especial, para a erradicação da pobreza e a segurança alimentar. Um dos principais resultados dessa conferência foi o acordo dos Estados membros em estabelecer objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS). Nessa conferência foi reconhecido a importância de promover ações para apoiar a população rural, especialmente os pequenos produtores, mulheres e comunidades tradicionais em situação de vulnerabilidade, visando a uma produção cada vez mais sustentável, tanto do ponto de vista ambiental como social e econômico, principalmente nos países mais pobres. Que só seria alcançado por meio da disponibilidade de crédito, serviços de financiamento, acesso a mercados, a terra, saúde, educação, assistência técnica e tecnologias ambientalmente adequadas e acessíveis aos produtores (Sambuichi *et al*, 2012).

Tsaples e Papathanasiou (2021) acrescentaram que o desenvolvimento sustentável também pressupõe a imposição de limites, e estes limites dizem respeito aos efeitos das ações humanas e da tecnologia sobre os recursos naturais e a capacidade do ecossistema de absorvê-los. Neste ponto é importante ressaltar que os serviços ecossistêmicos contribuem e ao mesmo tempo são afetados pela produção de bens e serviços, que são essenciais para os seres humanos. O setor agrícola, por exemplo, enquanto fornecedor de alimentos, afeta e pode ser afetado pelos serviços ecossistêmicos em um processo de sinergias e compensações (Toma *et al.,* 2017). Deste modo, o desenvolvimento sustentável diz respeito ao equilíbrio entre as interações do homem e a natureza de modo que o uso dos recursos naturais não comprometa a sua capacidade de regeneração e suporte.

Para além desses limites, o desenvolvimento sustentável deve ser capaz de promover a justiça na distribuição de recursos. De acordo com Tsaples e Papathanasiou (2021), o desenvolvimento sustentável não envolve apenas os aspectos ecológicos, mas os aspectos econômicos e socioculturais, e todos eles devem ser pensados e realizados dentro da capacidade de suporte da natureza.

Deste modo, o conceito de desenvolvimento sustentável é por natureza multidimensional e complexo, ele abrange aspectos econômicos, sociais, políticos, culturais e ambientais, assim como questões de equidade, garantindo que as gerações futuras também tenham acesso aos mesmos recursos (Sartori; Latrônico; Campos, 2014; Sachs, 2004). Seu conceito traz a necessidade de promover um equilíbrio entre os aspectos sociais, ambientais e econômicos, considerados como os pilares da sustentabilidade. No entanto, apesar de chamar a atenção para a necessidade de rever os padrões de consumo e produção, não se ignora a importância do crescimento econômico; o que se busca é conciliá-lo com a preservação do meio ambiente (Wbatuba *et al.,* 2022).

Logo, o que é conhecido como desenvolvimento sustentável tem evoluído e se concretizado como um conjunto de questões (econômicas, sociais, culturais e ambientais) que têm como fim a sustentabilidade, definida como a capacidade dos recursos naturais de manter suas propriedades essenciais e reabastecer a população. O seu conceito tem raízes na ecologia e pressupõe um uso regenerativo do sistema natural de forma que este mantenha as suas propriedades naturais e possa naturalmente repor o que foi extraído do ambiente. Em termos gerais, a sustentabilidade seria a perpetuidade dos sistemas naturais e dos processos (Zhou *et al*, 2018).

Em meio à necessidade de se desenvolver processos mais sustentáveis, surge a ideia de sustentabilidade agrícola, pois percebeu-se que, sem agricultura sustentável, a transição para o desenvolvimento sustentável não seria possível. Segundo a FAO (2025), transformações nos sistemas agroalimentares para uma produção mais sustentável contribuem para todos os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) em graus variados e são fundamentais para sua consecução final.

Conforme a FAO (2025), acabar com a pobreza, com a fome e melhorar a segurança alimentar (ODS 1 e 2) perpassa os direitos à terra e a resiliência nas áreas rurais. Da mesma forma, garantir saúde de qualidade para a população (ODS 3) implica em uma boa alimentação. E uma boa alimentação é fundamental para aumentar o número de crianças e jovens que podem concluir o ensino fundamental e médio (ODS 4). Além disso, promover a igualdade de acesso das mulheres à terra e aos recursos econômicos, aumentar a produção de alimentos e gerar ganhos econômicos de longo prazo para as comunidades rurais (ODS 5), distribuir mais alimentos com menos energia e com energia mais limpa (ODS 7), reduzir o desperdício de alimentos (ODS 12), proporcionar aos pequenos produtores acesso a tecnologias inovadoras

(ODS 9) e garantir seus direitos de posse de terras agrícolas (ODS 10) são as bases para desenvolver sistemas agroalimentares sustentáveis e, portanto, são essenciais para a atingir os seus objetivos.

Além disso, desenvolver sistemas agroalimentares mais sustentáveis tem o potencial de amenizar a questão da escassez de água (ODS 6) por meio da redução do uso excessivo de água no processo produtivo, de responder às mudanças climáticas (ODS 13) e proteger a biodiversidade aquática (ODS 14) e terrestre (ODS 15) do mundo. A promoção de sistemas agroalimentares sustentáveis também garantiria o crescimento econômico sustentável e empregos decentes nas áreas rurais (ODS 8), garantiriam o fornecimento de alimentos a preços acessíveis nas cidades (ODS 11) e contribuiriam significativamente para alcançar a paz por meio do fim da fome (ODS 16), algo que só pode ser alcançado em parceria com todos os atores da alimentação e da agricultura (ODS 17) (FAO, 2025).

2.4 Sustentabilidade agrícola: uma análise conceitual

Definir sustentabilidade agrícola, assim como qualquer outra forma de sustentabilidade, é uma tarefa desafiadora, uma vez que se trata de um conceito multidimensional. Ainda assim, há um consenso na literatura de que a sustentabilidade agrícola deve, no mínimo, contemplar os três pilares básicos da sustentabilidade, sendo avaliada simultaneamente por aspectos ambientais, econômicos e sociais (Lampridi1; Sørensen; Bochtis, 2019).

De acordo com Benayad, Baguare e Abdouh (2024), essa dificuldade decorre da necessidade de incluir, na mensuração da sustentabilidade agrícola, questões relacionadas aos meios de subsistência da população rural, aos impactos da agricultura no meio ambiente e ao aumento da produtividade das culturas, entre outras questões. Ademais, devem ser consideradas as interações entre os sistemas de produção agrícola, os ecossistemas naturais e as atividades humanas, o que ampliam a complexidade do conceito.

Talukder, Hipel e VanLoon (2018) definem sustentabilidade agrícola como a produção de alimentos e fibras de forma produtiva e economicamente eficiente, utilizando práticas que mantêm ou melhoram a qualidade do ambiente local e o que está à sua volta, como o solo, água, ar e todos os seres vivos. Já a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) segue a definição clássica de sustentabilidade agrícola, que é satisfazer as

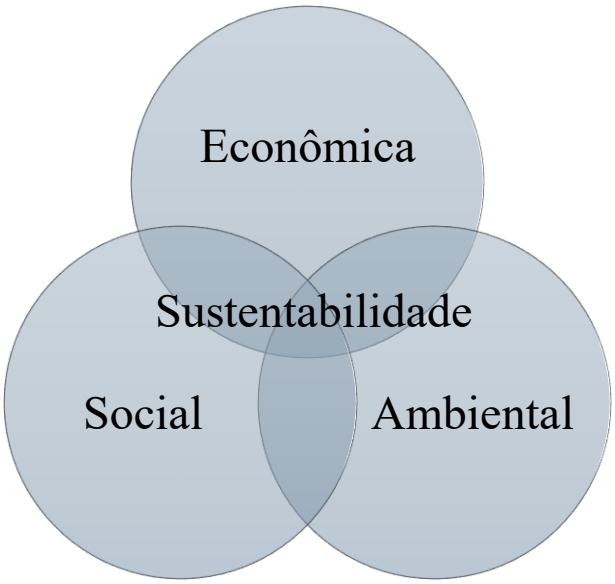
necessidades das gerações presentes e futuras, garantindo, ao mesmo tempo, a rentabilidade, a saúde ambiental e a equidade social e econômica (FAO, 2023).

Portanto, a mensuração da sustentabilidade agrícola é análise necessariamente multidimensional e requer uma abordagem holística, beseada em indicadores que representem as três dimensões da sustentabilidade. A construção de um índice a partir desse conjunto de indicadores permite fornecer uma estrutura analítica abrangente e significativa da sustentabilidade, fundamentada em informações relevantes para a formulação de políticas públicas, compreensíveis para a sociedade e úteis ao processo de tomada de decisão (Benayad, Baguare e Abdouh, 2024).

Neste contexto, os índices compostos que mensuram a sustentabilidade agrícola ganham destaque na literatura e são difundidos em todas as economias. E são desenvolvidos para mensurar e acompanhar a evolução da sustentabilidade agrícola. Esses índices refletem as trocas entre as atividades humanas e o meio ambiente, fornecendo um panorama dessas relações e seus impactos.

Neste estudo, a sustentabilidade agrícola é abordada a partir da perspectiva da teoria do tripé da sustentabilidade (econômica, social e ambiental), que é a conceitualização mais comum em meio aos estudos sobre sustentabilidade (Janker; Mann, 2020). Nessa abordagem, a sustentabilidade é apresentada como uma intersecção entre o meio ambiente, a sociedade e a economia. Sendo a sustentabilidade o produto final, e o desenvolvimento sustentável é o processo para a sua conquista. Esses se tornaram conceitos chaves para o alcance global de um novo padrão de vida responsável com o bem-estar das gerações futuras.

Figura 1: Tripé da sustentabilidade



Fonte: Adaptado de Janker e Mann, 2020.

Dessa forma, qualquer orientação de políticas públicas que almeje o crescimento econômico deve ser benéfica para o meio ambiente, socialmente aceitável e economicamente viável para ser aceita pela sociedade.

De acordo com Bonnet, Coll-Martínez e Renou-Maissant (2021), a dimensão ambiental da sustentabilidade refere-se aos recursos naturais e à capacidade dos sistemas biológicos de manter suas funções e processos indefinidamente. Ela se concentra no capital natural e destaca a insubstituibilidade dos recursos ecossistêmicos. A dimensão social diz respeito à redução das desigualdades dos padrões de vida das pessoas. Já a dimensão econômica se refere à geração de emprego e renda para as famílias. Desta forma, a agricultura só alcançará a sustentabilidade se conseguir gerar um equilíbrio entre as três dimensões. Ou seja, a agricultura sustentável visa a redução de externalidades negativas no meio ambiente e na saúde, utilizando os recursos do ecossistema local de forma eficiente, preservando a biodiversidade (Bathaei; Štreimikienė, 2023).

O interesse pela avaliação da sustentabilidade agrícola tem crescido nos últimos anos em razão do papel social do setor agrícola para a economia mundial (Sinisterra-Solís *et al.,* 2024). A agricultura é a principal fonte geradora de alimentos, de divisas e renda para os pequenos, médios e grandes produtores rurais. E em meio a esses estudos há um consenso sobre

a necessidade de desenvolver índices compostos para mensurar e acompanhar a evolução dos níveis de sustentabilidade (Valizadeh; Hayati, 2021).

Conforme Tsaples, Papathanasiou e Georgiou (2022), pela natureza multidimensional da sustentabilidade os métodos de mensuração devem ser transparentes, fáceis de entender e passíveis de revisão por especialistas. Entre os métodos mais utilizados na literatura para mensurar a sustentabilidade, os autores destacam a Análise Envoltória de Dados (DEA), que avalia a eficiência técnica de Unidades Tomadoras de Decisão (DMUs). Que é medida pela capacidade de uma DMU transformar insumos (*inputs)* em produtos (*outputs)*, sendo calculada como a razão entre a soma ponderada dos *outputs* e a soma ponderada dos *inputs* (ver seção 3.4.2).

Outro método muito comum para mensurar índices compostos é a Análise de Componentes Principais, também recomendada pela OCDE (2008) para calcular índices compostos (ver seção 3.4.1). O método dos Componentes Principais tem a vantagem de agregar um conjunto grande de indicadores em poucos componentes, facilitando a análise e compreensão de fatores multidimensionais como a sustentabilidade.

Assim, alcançar a sustentabilidade exige um esforço contínuo e complexo. O primeiro passo para isso é medi-la, e a melhor forma de fazer isso é por meio da análise de indicadores de sustentabilidade. Na seção 2.5 será apresentada uma revisão empírica que demonstra o uso de índices compostos para avaliar a sustentabilidade e como isso tem sido feito nos últimos anos.

2.5 Índices de sustentabilidade recentes: uma revisão empírica

O uso de índices compostos para medir desempenho tem crescido na literatura, com aplicações em diversas áreas de pesquisa, especialmente após a publicação da Agenda 2030, que definiu a necessidade de desenvolver índices de sustentabilidade, para que se tenham bases sólidas para a tomada de decisões. Desde então, diversas instituições, pesquisadores e organizações passaram a desenvolver uma infinidade de índices para mensurar o nível de sustentabilidade e, com isso, mapear e entender o cenário e então definir políticas e estratégias para avançar em direção a um ambiente mais sustentável.

Deste modo, diversos índices têm sido criados em nível global, nacional e regional, a exemplo do Índice de Desenvolvimento Humano (PNUD, 2016), Índice de Desempenho Ambiental, o Índice de Disparidade de Género e o Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal

(Firjan, 2016), entre outros. Tornando-se prática comum na literatura. Greco *et. al* (2019), em seu estudo, mostraram que, até 2016, ao buscar por "índices compostos" na plataforma SCOPUS, havia cerca de 600 estudos disponíveis, o que já nos dá uma boa compreensão da sua popularidade no meio acadêmico (Ferreira *et al.,* 2023; Sala-Garrido *et al*., 2021; Greco *et al*., 2019).

Como apontado por Shaker e Sirodoev (2016), esses índices podem ser usados para analisar, comunicar, simplificar e quantificar informações complexas em resultados significativos. Sendo cada vez mais aceitos como ferramentas úteis para a formulação de políticas públicas, pois transmitem informações sobre o desempenho de um país, região ou município em relação a seus objetivos.

Como visto nas seções 2.1 a 2.3, o desenvolvimento é um fenômeno complexo e multidimensional, e, por isso, não pode ser mensurado por meio de indicadores únicos, que não oferecem uma visão abrangente e integrada do desenvolvimento, tão importante para o seu entendimento (Greco *et al*., 2019). Desta forma, dispor de uma medida de sustentabilidade para regiões ou localidades é essencial para analisar questões de equidade intrageracional e intergeracional na alocação de recursos. Além de ajudar a otimizar o uso dos recursos naturais, tornando sua utilização mais eficiente (Kwatra; Kumar; Sharma, 2020). Isso permite avaliar as melhorias realizadas ao longo do tempo, verificando se foram positivas, negativas, ou se não houve mudanças significativas.

Portanto, a mensuração de um índice composto de sustentabilidade deve envolver um conjunto de indicadores que representem a multidimensionalidade desse fenômeno. Para tanto, diversas metodologias e técnicas têm sido aplicadas na literatura com o objetivo de sintetizar diferentes indicadores individuais de forma otimizada. Isso facilita a identificação das áreas mais críticas em termos de sustentabilidade e permite avaliar os efeitos das políticas públicas planejadas para determinadas localidades, regiões ou países.

Em uma busca por estudos que analisam a sustentabilidade rural a partir de índices compostos, identificou-se que, de modo geral, os estudos conduzidos até o momento partem da abordagem tridimensional da sustentabilidade e utilizam diferentes ferramentas metodológicas para mensurá-la, com predominância do uso do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA) e suas variações, e empregam uma variedade de indicadores como apresentado no Quadro 1.

Essa forte tendência de utilizar o modelo DEA foi demonstrada no estudo de Zhou *et al.* (2018), que ao realizarem uma revisão da literatura sobre o uso do modelo DEA em estudos de sustentabilidade regional, cobrindo publicações até 2016, eles identificaram uma grande tendência de utilizar o modelo DEA para medir sustentabilidade, com foco principalmente nas dimensões econômica e ambiental. Observaram também uma tendência crescente de combinar o modelo DEA com outras metodologias, a exemplo do modelo de Análise de Componentes Principais e de modelos de regressão, com o objetivo de aumentar a robustez das análises, mitigando as limitações metodológicas dos modelos. Além disso, constataram que, embora os primeiros estudos se baseassem em modelos clássicos do DEA, nos anos mais recentes, versões mais sofisticadas, como o modelo do *Benefit of the Doubt*, passaram a ser utilizadas.

Também Tsaples e Papathanasiou (2021) realizaram uma revisão da literatura sobre DEA e sustentabilidade abrangendo o período de 2016 a 2020 e descobriram que, nesse período, houve esforços para incluir parâmetros relacionados ao avanço tecnológico e à inovação na avaliação da sustentabilidade, embora o modelo tridimensional da sustentabilidade (econômico, ambiental e social) continue sendo o mais comum.

2.5.1 Revisão Empírica de Índice de Sustentabilidade

Benayad, Baguare e Abdouh (2024) propuseram um índice composto para medir a sustentabilidade regional, com aplicação ao setor agrícola na região de Fès-Meknès (FMR) no Marrocos. O procedimento foi estendido para elaboração de índices compostos em cinco regiões marroquinas, com o objetivo de criar uma base comparativa para o desempenho da sustentabilidade agrícola inter-regional. O índice da região de Fès-Meknès (FMRI) foi obtido a partir da agregação geométrico de 24 indicadores. Os resultados mostraram que a FMR é moderadamente sustentável, os autores destacaram a necessidade de ferramentas de governança e de uma abordagem participativa para apoiar os tomadores de decisão e fortalecer a democracia regional.

Ferreira, Branchi e Oliveira (2024) propuseram um Índice de Desenvolvimento Rural Sustentável para as microrregiões brasileiras. Para isso, aplicaram o método de Análise Componentes Principais a um conjunto de 22 variáveis. Os autores identificaram que as condições de desenvolvimento rural sustentável das microrregiões brasileiras apresentam, em geral, um cenário preocupante: os índices foram muito baixos, indicando que há um longo caminho a ser percorrido para melhorar os níveis de desenvolvimento rural sustentável no Brasil.

López-Penabad, Iglesias-Casal e Rey-Ares (2022) propuseram um índice de desenvolvimento rural sustentável para os municípios rurais galegos, baseado no modelo *Benefit of the Doubt,* considerando quatro dimensões: econômica, demográfica, social e ambiental. Os autores utilizaram 10 indicadores que representam as quatro dimensões. O índice proposto foi comparado aos índices obtidos a partir dos modelos de pesos comuns, supereficiência, média geométrica e modelos de normalização logística. Em um segundo momento, utilizando o modelo de regressão truncada, os autores analisaram quais fatores exógenos influenciam o desenvolvimento rural sustentável da região. Segundo os autores, as evidências encontradas permitem embasar ações que promovam o progresso sustentável dos municípios rurais galegos, sendo úteis para enfrentar esse complexo problema.

Magrini e Giambona (2022), avaliando a sustentabilidade agrícola na União Europeia (UE), propuseram um índice composto com base na agregação geométrica de 12 indicadores básicos, medidos anualmente no período de 2004 a 2020, para todos os países da UE, além do Reino Unido. Os pesos foram determinados endogenamente, de acordo com a abordagem *Benefit of the Doubt*. O índice proposto pelos autores é composto pelas dimensões econômica, social e ambiental.

Abdar *et al.* (2022) propuseram um índice composto para mensurar a sustentabilidade da agricultura nas províncias iranianas, no período de 2007 a 2017, utilizando um processo de quatro etapas: seleção dos indicadores, normalização pelo método Min-Max, determinação dos pesos pelo método do Processo Hierárquico Analítico e o cálculo do índice utilizando a soma ponderada dos indicadores. Selecionaram 24 indicadores individuais, abrangendo as dimensões econômica, social e ambiental. Segundo os autores, os índices compostos construídos podem ser ferramentas úteis para os formuladores de políticas públicas, ao permitir a identificação de pontos fortes e fracos da agricultura no contexto do desenvolvimento sustentável. Além disso, possibilitam a comparação entre diferentes regiões quanto ao nível de sustentabilidade agrícola, viabilizando sua avaliação ao longo do tempo e o direcionamento de políticas agrícolas mais eficazes.

Moura e Campos (2022) propuseram um índice de desenvolvimento rural para a região do Matopiba, a partir do modelo de Análise Fatorial, com o objetivo de analisar os fatores determinantes do desenvolvimento rural. Os autores utilizaram 12 variáveis que contemplam as dimensões relacionadas ao uso intensivo de conhecimento e recursos hídricos na agricultura, ao uso intensivo de capital e mão de obra, além da adoção de práticas agrícolas sustentáveis.

Os resultados mostraram uma expressiva heterogeneidade no desenvolvimento rural dos municípios do Matopiba: dos 305 municípios analisados, 90,16% obtiveram um IDR muito baixo ou baixo. Os autores também identificaram uma baixa correlação entre o índice de desenvolvimento rural calculado e o PIB agrícola, o que reforça o caráter multidimensional do desenvolvimento rural, que vai além dos níveis de renda.

Valizadeh e Hayati (2021) propuseram um índice para mensurar a sustentabilidade agrícola, adotando um processo multiestágio para seu desenvolvimento e validação. Para a elaboração do índice, os autores utilizaram os métodos de Análise de Componentes Principais e Análise Fatorial Confirmatória. Foram considerados 23 indicadores distribuídos nas dimensões econômica, social e ecológica. A Análise de Componentes Principais agrupou os indicadores em quatro fatores: "equidade social e bem-estar", "durabilidade", "estabilidade e compatibilidade" e "produtividade e eficiência". Em seguida, a estrutura fatorial do índice foi então submetida à Análise Fatorial Confirmatória, cujos índices de ajuste do modelo comprovaram a estrutura de mensuração do índice.

Fernández Martínez *et al.* (2020) propuseram índice composto de desenvolvimento rural sustentável (nSRDI) para 10 regiões (comarcas) da província de Huesca, na Espanha. O índice foi construído com base no modelo do *Benefit of the Doubt* considerando três dimensões: social, econômica e ambiental e 21 indicadores. Os autores também investigaram os efeitos de diferentes métodos de ponderação sobre o nSRDI, gerando um *ranking* das regiões conforme os resultados obtidos.

Moura e Sousa (2020) mensuraram o Índice de Desenvolvimento Rural (IDR) nos municípios cearenses e pernambucanos, utilizando a técnica estatística multivariada de Análise de Componentes Principais, e relacionaram o índice com o Produto Interno Bruto (PIB) agrícola e com a população rural por meio da correlação de Pearson. Para isso, utilizaram 15 variáveis, divididas em três dimensões: socioeconômica, demográfica e ambiental. Os resultados revelaram significativa heterogeneidade no desenvolvimento rural: dos 330 municípios analisados, 56,36% apresentaram IDR baixo ou muito baixo, e apenas 4,24% atingiram IDR muitíssimo alto. Além disso, observou-se que o PIB agrícola e a população rural apresentaram, respectivamente, correlação forte e moderada com o IDR.

González-García *et al*. (2019) propuseram uma metodologia de avaliação da sustentabilidade com base em 38 indicadores, abrangendo os três pilares da sustentabilidade: social, econômico e ambiental. Para essa avaliação, foram selecionados 64 municípios dentre

os 313 localizados na Galiza (noroeste da Espanha), classificados em três categorias de acordo com o tamanho populacional (médio, pequeno e vilas). A ponderação dos indicadores foi realizada por meio dos métodos: ponderação igual e ponderação definida pelo método do Processo de Hierarquia Analítica.

Reig-Martínez, Gómez-Limón e Picazo-Tadeo (2011), em um estudo sobre a sustentabilidade de 163 fazendas localizadas no Condado de Campos, uma região pertencente às terras áridas do Planalto Norte Espanhol, construíram um índice composto considerando as diferentes dimensões da sustentabilidade agrícola, a partir do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA) em conjunto com o modelo de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM). Nesse estudo, foram atribuídos pesos comuns a cada indicador individual de sustentabilidade. Para isso, utilizaram 12 indicadores individuais e aplicaram técnicas estatísticas de *bootstrapping* para verificar a influência de um conjunto de variáveis na sustentabilidade agrícola. Identificaram que o aumento do tamanho da fazenda, a participação em cooperativas agrícolas e a formação técnica (média e superior) específica para agricultura exercem influência positiva e significativa sobre a sustentabilidade das fazendas.

Observa-se nos estudos selecionados que todos usam de índices compostos para mensurar a sustentabilidade. As principais diferenças entre os estudos referem-se aos métodos de agregação e ponderação empregados. López-Penabad, Iglesias-Casal e Rey-Ares (2022), Fernández Martínez *et al.* (2020), Magrini e Giambona (2022) e Reig-Martínez, Gómez-Limón e Picazo-Tadeo (2011) utilizaram como base o modelo *Benefit of the Doubt* da Análise Envoltória de Dados (DEA). Ferreira, Branchi e Oliveira (2024), Valizadeh e Hayati (2021), Moura e Campos (2022) e Moura e Souza (2020) adotam o método de Análise de Componentes Principais. Já Benayad, Baguare e Abdouh (2024), Abdar *et. al* (2022), González-García *et al*. (2019) utilizam o modelo de Análise Hierárquica de Processos. Em geral, o método de agregação é a média ponderada; dos onze estudos analisados, apenas Magrini e Giambona (2022) empregaram a agregação geométrica.

Em López-Penabad, Iglesias-Casal e Rey-Ares (2022) e Reig-Martínez, Gómez-Limón e Picazo-Tadeo (2011), a sustentabilidade rural foi avaliada em dois estágios. No primeiro estágio, foram estimados os respectivos índices de sustentabilidade, e no segundo estágio analisou-se o efeito de fatores exógenos sobre os índices calculados. No estudo de López-Penabad, Iglesias-Casal e Rey-Ares (2022), o efeito das variáveis exógenas foi estimado por

meio de um modelo de regressão truncada. Reig-Martínez, Gómez-Limón e Picazo-Tadeo (2011) utilizaram a técnica estatística de *bootstrapping.*

A análise em dois estágios também é comum em estudos que avaliam a eficiência. Silva, Justo e Cavalcante (2022) avaliaram a eficiência técnica e de escala dos estabelecimentos agropecuários das 35 regiões intermediárias do Nordeste brasileiro para o ano de 2017 em dois estágios. No primeiro, aplicaram a Análise Envoltória de Dados com orientação a insumo, e, no segundo, utilizaram o modelo Tobit normal truncado para avaliar o efeito de fatores exógenos sob a eficiência calculada. Os resultados obtidos revelaram que a maioria das regiões intermediárias são plenamente eficientes, tanto do ponto de vista técnico como de escala. Além disso, os autores identificaram, por meio do modelo Tobit, que variáveis como adubação, irrigação, acesso ao financiamento e escolaridade média e regular elevam a eficiência. Enquanto, fatores como a área total dos estabelecimentos, assistência técnica, rotação de cultura e plantio em curva de nível apresentam efeito negativo sobre a eficiência.

Ervural, Zaim e Delen (2018) avaliaram a eficiência energética sustentável em dois estágios: primeiramente, utilizando o modelo DEA, e, em seguida, os modelos de Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) e de regressão Tobit para investigar a influência de variáveis exógenas. Os autores destacam que o uso conjunto dos modelos DEA, OLS e Tobit permite superar algumas das limitações de cada método quando aplicados isoladamente. Os resultados apontaram que as variáveis exógenas exercem influência direta e positiva sobre a eficiência energética.

Chen, Xu, Chen (2017) aplicaram os métodos DEA de supereficiência e índice de Malmquist para mensurar a eficiência ambiental estática e dinâmica de 131 cidades chinesas no período de 2003 e 2014, e avaliaram a influência de fatores exógenos na eficiência energética a partir do modelo Tobit em painel. Da mesma forma, Feng *et al*. (2017) utilizaram o modelo de Análise Envoltória de Dados para estimar os padrões globais de desempenho do desenvolvimento verde, e aplicaram posteriormente o modelo Tobit para identificar os fatores que influenciam o desenvolvimento verde.

Além dos estudos mencionados, a abordagem do *Benefit of the Doubt* também tem sido aplicada em diferentes áreas para o cálculo de índices compostos, como: empresas públicas de água, esgoto e resíduos sólidos (Mergoni, D'Inverno Carosi, 2022), usinas hidrelétricas (Zanella; Camanho; Dias, 2015, Calabria; Camanho e Zanella, 2018), gestão de resíduos sólidos (Rogge; Jaeger e Lavigne, 2017, Lavigne; Jaeger e Rogge, 2019) e desempenho social de

empresas de mineração (Oliveira, Zanella e Camanho, 2020). Nesses estudos, foi aplicada a versão do modelo *Benefit of the Doubt* formulado a partir da Função de Distância Direcional proposta por Chung *et al* (1997) com a inclusão de fatores indesejáveis - abordagem que também é adotada nesta pesquisa.

Em geral, os estudos analisados utilizam as três dimensões clássicas da sustentabilidade rural: social, econômica e ambiental. As variáveis empregadas na dimensão social estão relacionadas à escolaridade, acesso a serviços de saúde e atenção básica; na dimensão econômica, prevalecem indicadores de trabalho e renda, valor e volume da produção agropecuária, além da participação do setor no PIB; e na dimensão ambiental, são recorrentes variáveis como a proporção de áreas de preservação, o uso de práticas agrícolas sustentáveis, e a presença de corpos d'água e áreas florestais, entendendo que a manutenção desses recursos é condição necessária para garantir a sustentabilidade.

Como visto, a análise da sustentabilidade tem sido amplamente discutida no meio acadêmico, e essa discussão tem se intensificado nos últimos anos devido à relevância do tema, às transformações ocorridas no meio rural e às mudanças climáticas, que têm impulsionado as nações a buscarem formas mais sustentáveis de produção. No entanto, é importante destacar a escassez de estudos empíricos que analisem a sustentabilidade rural utilizando o modelo *Benefit of the Doubt* formulado a partir da Função de Distância Direcional a qual permite a inclusão simultânea de fatores desejáveis e indesejáveis, sobretudo, estudo que analise a região do semiárido baiano.

Cada estudo mencionado aborda a temática sob diferentes perspectivas e recortes espaciais, o que evidencia a importância de manter e ampliar a discussão, a fim de compreender como cada território responde aos estímulos do desenvolvimento sustentável e quais são suas principais fragilidades em relação às dimensões que compõem a sustentabilidade. Outro ponto importante identificado na revisão empírica é que no Brasil a grande maioria dos estudos aplicam Análise de Componentes Principais para mensurar índices compostos, sendo pouco aplicado os modelos DEA, que tem se mostrado eficaz para análise de sustentabilidade, e é bastante utilizado no contexto internacional.

2.6 Crédito rural e o seu papel na promoção da sustentabilidade

Em 1965, o governo federal criou o Sistema Nacional de Crédito Rural, consolidando oficialmente o apoio governamental ao setor agropecuário brasileiro. Desde então, o crédito rural tem sido o principal instrumento de política agrícola no país, voltado a promover a produtividade e o aumento de renda dos produtores rurais (Lopes; Lowery; Peroba, 2016). Atendendo, sobretudo, aqueles produtores que não possuem recursos financeiros suficientes para gerenciar a sua propriedade e a produção.

O crédito rural também foi a base da modernização da agricultura brasileira, financiando tanto lavouras já existentes quanto a implantação de novas áreas de cultivo. Esteve associado a expansão das áreas agrícolas por meio da substituição das áreas nativas principalmente na regiões Centro-Sul país. Ainda hoje nos biomas da Amazonia e Cerrado, o crescimento da produção em parte financiado com os recursos do crédito rural está associado ao desmatamento. Entretanto, mais recentemente a política crédito incorpora o financiamento da produção sustentável.

De acordo com Bento e Vieira Filho (2022, p.01) a política de crédito rural possui cinco objetivos principais:

> i) estimular os investimentos rurais efetuados por cooperativas ou pelos produtores na sua propriedade rural; ii) favorecer o custeio da produção e a comercialização da produção; iii) incentivar a adoção de mais conhecimentos e tecnologias, visando ao crescimento da produtividade, à melhoria do padrão de vida das populações rurais e à adequada defesa dos recursos naturais; iv) viabilizar a aquisição e regulamentação de terras pelos pequenos produtores; e v) impulsionar a geração de renda e o melhor uso da mão de obra na agricultura familiar.

São destinados a quatro finalidades: custeio, investimento, comercialização e industrialização. O crédito custeio cobre as despesas dos ciclos produtivos, desde a compra de insumos até a fase de colheita. O crédito investimento destina-se à aquisição de bens e serviços duráveis, como máquinas e equipamentos agrícolas. O crédito comercialização cobre as despesas inerentes à comercialização dos produtos no mercado. O crédito industrialização destina-se à industrialização de produtos agropecuários (Bacen, 2024).

Ao longo dos anos, diversos programas foram criados para disponibilizar crédito rural aos produtores e cooperativas, com o objetivo de desenvolver o setor por meio de linhas de crédito de baixo custo para viabilizar o investimento em maquinários, arcar com os custos da produção e modernização agrícola. Dentre eles destacam-se: o Programa Nacional de

Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), criado em 1995 e destinado especialmente a agricultores familiares e assentados da reforma agrária; o Plano Safra (2003), que auxilia os produtores a custearem e investirem na safra; e o Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (PROAGRO), de 1973, que assegura o pagamento de financiamentos de custeio agrícola em caso de perdas por eventos climáticos ou pragas (Bacen, 2020).

No Brasil, o crédito rural também está entre as iniciativas adotadas pelo governo federal para promover uma produção agrícola mais sustentável. O Programa para Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa na Agricultura (Plano ABC), criado em 2010 pela Resolução BACEN nº 3.896/2010, é um exemplo dessas iniciativas. O Plano ABC é a principal linha de crédito rural orientada para promover preservação ambiental. O objetivo é reduzir as emissões de gases do efeito estufa da agropecuária por meio de práticas e tecnologias que aumentam a eficiência produtiva e o uso racional dos recursos naturais, para que se tenha uma agropecuária mais adaptada às mudanças climáticas e mitigadora de gases de efeito estufa. Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), para o Plano Safra 2020-2021, o programa contou com cerca de R$ 2,5 bilhões para o financiamento de atividades previstas no Plano (Gheller; Gazolla; Marini, 2019).

Outras iniciativas do governo seguem a mesma direção, como o Programa de Modernização da Agricultura e Conservação de Recursos Naturais (Programa Moderagro), que tem como objetivo financiar projetos de modernização e expansão da produtividade nos setores agropecuários e financiar ações voltadas à recuperação do solo e à defesa animal. O Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica na Produção Agropecuária (Programa Inovagro), que tem como objetivo financiar a incorporação de inovações tecnológicas nas propriedades rurais, visando o aumento da produtividade, a adoção de boas práticas agropecuárias e de gestão da propriedade rural, e a inserção competitiva dos produtores rurais nos mercados consumidores (BNDES, 2024).

Mais recentemente, no Plano Safra (2020/21), o governo ampliou o limite de empréstimo para os agricultores que tenham o Cadastro Ambiental Rural (CAR)[2] validado. O limite de crédito para a modalidade custeio passa a ser 10% maior para aqueles produtores que tenham o CAR validado (Souza; Herschmann; Assunção, 2020). Para o Plano Safra 2023/24 o

[2] O Cadastro Ambiental Rural (CAR) é um registro público eletrônico obrigatório para todos os imóveis rurais no Brasil e tem como objetivo integrar informações ambientais das propriedades rurais, promovendo a regularização e o manejo sustentável dos recursos naturais. Sendo uma ferramenta essencial de controle, monitoramento, planejamento ambiental e econômico e combate ao desmatamento.

Ministério da Agricultura informou que trabalha com uma proposta de redução de 0,5 pontos percentuais nos juros da modalidade custeio para os produtores que estejam cadastrados no CAR e que adotam técnicas conservacionistas na produção.

A literatura nacional e internacional reforça a importância da política de crédito rural para a sustentabilidade. Os estudos realizados mostram que o acesso ao crédito rural impacta diretamente a eficiência técnica dos produtores rurais, viabilizando a adoção de insumos e inovações tecnológicas que proporcionam ganhos de produtividade e aumento da eficiência (Yadav; Rao, 2022; Haryanto *et al.,* 2023; Seven; Tumen, 2020). Para Seven e Tumen (2020), a produção agrícola, por estar tipicamente relacionada a um intervalo de tempo específico, que vai desde o cultivo - quando são feitos os primeiros investimentos, até a fase da colheita e comercialização dos produtos - quando se concretizam os investimentos, fica vulnerável a diversos riscos e incertezas climáticas e de flutuação de preços. Nesse contexto, o acesso aos mercados de crédito desempenha um papel crucial na suavização desses riscos, favorecendo decisões produtivas mais eficientes e garantindo o crescimento sustentável da produtividade agrícola.

Batung *et al*. (2023) destacaram que o crédito é indispensável em todas as fases da produção agrícola. Em seu estudo no semiárido norte do Gana eles identificaram que as famílias com acesso ao crédito eram significativamente mais propensas a reportar uma boa resiliência em comparação com as famílias que não tinham qualquer forma de acesso ao crédito, evidenciando a relevância da disponibilidade de recursos financeiros para adaptação às mudanças climáticas, fortalecimento da resiliência e desenvolvimento agrícola.

Hunjra *et al.* (2022) destacaram que o desenvolvimento financeiro também é importante para atingir o desenvolvimento econômico sustentável, uma vez que a inclusão financeira possibilita alocar recursos para promover a transição para um modelo de produção sustentável. Muitas indústrias ainda necessitam de financiamento para fazerem essa transição. Isso é ainda mais crítico em regiões de baixa e média renda, onde o setor primário ainda é a principal atividade econômica. De acordo com os autores, nas economias de baixa renda, que em geral possuem uma base tecnológica ainda primitiva, a poluição do ar e da água é maior, nestas circunstâncias a inclusão financeira se torna um canal importante para enfrentar os desafios relacionados às mudanças climáticas. Os autores defendem que uma política de empréstimos eficaz poderia melhorar o acesso dos agricultores ao crédito, permitindo-lhes adotar tecnologias avançadas e, assim, lidar de forma mais eficaz com os desafios da sustentabilidade.

Souza, Mourão e Assunção (2021) mostraram que o aumento da oferta de crédito torna a produção mais eficiente, reduzindo as pressões por desmatamento, uma vez que dispondo de recursos do crédito os produtores têm a possibilidade de intensificar o uso da terra, tornando-a mais produtiva, eliminando a necessidade de abertura de novas áreas de cultivo.

Da mesma forma, Assunção *et al.* (2020) mostram que um incremento no crédito rural leva a uma expansão da área de cultivo e a uma redução na área de pastagens, com efeito positivo sobre as áreas de floresta, reduzindo a pressão sobre o desmatamento. Ou seja, a ampliação da política de crédito intensifica a produção agrícola ao mesmo tempo que reduz a pressão sob o desmatamento. Isso ocorre porque a restrição de crédito afeta as decisões de produção, especialmente no que se refere à adoção de novas tecnologias que aumentam a produtividade, levando a ineficiências na produção.

Segundo Souza, Herschmann e Assunsão (2020), o Brasil consegue ampliar a produção agropecuária utilizando apenas as áreas já desmatadas, sem a necessidade de derrubar mais vegetação nativa. Apenas convertendo pastagens em áreas de cultivo e ampliando a produtividade, é possível quase duplicar a produção nacional sem desmatar as florestas. No entanto, para alcançar esse potencial, é preciso disponibilizar recursos para investimentos e custeio, pois isso demanda investimentos e tem um elevado custo para os produtores. Os autores acrescentam que a política de crédito rural tem um grande potencial para promover a produção sustentável no Brasil e de ser alinhada aos objetivos da sustentabilidade. O Brasil é uma grande potência no ramo do agronegócio e se destaca como um dos maiores produtores de alimento do mundo, com um importante papel na segurança alimentar global. Além disso, possui uma extensa riqueza em termos de biodiversidade. Neste sentido, políticas de crédito adequadas contribuem para modernizar e intensificar a produção agrícola, melhorando a alocação e utilização dos recursos naturais.

De acordo com Assunção e Bragança (2019), o Brasil pode expandir a produção agrícola entre 79% e 105% e a produção de carne em 27% sem desmatamento. Todavia, a obtenção desses ganhos demanda grandes investimentos para modernizar as operações, isso gera custos adicionais aos produtores. Desta forma, para aproveitar o potencial do país de expandir a produção sem ampliar o desmatamento, é preciso promover políticas públicas que auxiliem os produtores a vencerem as barreiras que dificultam a modernização de suas práticas e a adoção de novas tecnologias e equipamentos.

Carrer *et al*. (2020), em um estudo sobre a eficácia da política de crédito rural para aumentar a adoção de sistemas integrados Lavoura-Pecuária no estado de São Paulo, identificaram que o crédito rural tem impactos positivos e relevantes na adoção deste sistema. De acordo com os autores, o sistema de integração Lavoura-Pecuária produz uma série de benefícios, tais como: a restauração de pastagens degradadas, melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, redução das emissões de gases de efeito estufa, economia de escopo e diversificação da renda rural. Segundo os autores, o efeito positivo e estatisticamente significativo do crédito rural sobre a adoção do sistema de integração Lavoura-Pecuária revela o importante papel da política de crédito rural no Brasil e a sua contribuição para acelerar a difusão de sistemas agrícolas sustentáveis, como o sistema de integração.

Já Ali, Deininger e Duponchel (2014), em um estudo com agricultores de Ruanda, identificaram que os agricultores que tiveram acesso ao crédito foram os que adotaram mais intensamente os insumos e novas tecnologias. Se as restrições de crédito fossem eliminadas, a produtividade média das explorações agrícolas aumentaria 17%.

No Brasil, a política de crédito rural foi desenhada com o objetivo de fomentar a atividade agrícola, e se consolidou como a principal política de incentivo e apoio à modernização do setor. Essa política conta com instrumentos como subsídios, alocação de recursos conforme a finalidade (investimento, custeio, comercialização e industrialização) e diferenciação entre pequenos produtores, médios produtores e assentamentos rurais. No entanto, a distribuição desse crédito tem sido desigual, concentrando-se nos grandes centros, enquanto regiões mais carentes, como as regiões Norte e Nordeste, permanecem desassistidas. Sendo a política de crédito rural estratégica para o setor agrícola, especialmente para a adoção de novas tecnologias e equipamentos, o maior acesso aos recursos de crédito pode gerar efeitos positivos no nível de sustentabilidade rural, funcionando como uma ponte entre os produtores e práticas agrícolas mais modernas e sustentáveis.

Estudos recentes como os de Amaral e Bacha (2025), Machado *et al.* (2024), Wesz Junior (2021), Oliveira (2016) e Belik (2015), mostram que as regiões Sul e Sudeste concentram maior volume de crédito. Conforme dados do Censo Agropecuário de 2017, apenas 15,7% dos produtores rurais tiveram acesso ao crédito subsidiado. A região Nordeste, que detém cerca de 45,7% do total de estabelecimentos rurais do país, concentra apenas 10% do valor dos contratos de crédito rural disponibilizados, enquanto a região Centro-Sul concentra cerca de 54% do valor dos contratos ofertados (Bacen, 2022; IBGE/SIDRA, 2022).

Como demostrado por Amaral e Bacha (2025), essa concentração de crédito na região Sudeste e, especialmente, na região Sul do país pode ser explicada pela forte presença de cooperativas, maior uso de seguros, técnicas avançadas de produção, maior disponibilidade de garantias para o sistema financeiro por parte dos produtores, melhor infraestrutura, produtores altamente capitalizados, forte presença de orientação técnica, além de se tratar de grandes exportadores de *commodities*.

Tal restrição limita o desenvolvimento rural. Conforme Moreira-Dantas *et. al*. (2023), a disponibilidade de recursos financeiros ou a sua restrição é um fato determinante no processo de tomada de decisão dos agricultores. Os agricultores que têm acesso ao crédito dispõem de maior liquidez e, com isso, são mais propensos a adotarem projetos mais arriscados e com maiores expectativas de retorno. Consequentemente, também serão mais propensos a alocarem seus recursos de forma mais eficiente, a adotarem inovações e investir em ativos fixos.

Nesse sentido, conforme Mejía et al. (2021), o crédito pode ser uma ferramenta relevante para promover a inovação e melhorar a alocação de recursos. Quando adequadamente direcionado, pode contribuir para a redução das lacunas de desigualdade, gerando um ciclo virtuoso de prosperidade econômica.

De acordo com Souza, Herschmann e Assunsão (2020), a política de crédito rural desempenhou um papel importante na economia. Contribuindo para a modernização da agropecuária brasileira e servindo de apoio para que os produtores enfrentem as incertezas e adversidades inerentes à atividade agrícola, como mudanças climáticas, flutuações de preços e crises, além de possuir um grande potencial de estimular o desenvolvimento de sistemas de produção mais sustentáveis. Uma política adequada contribui para modernizar e intensificar a produção agrícola, ao mesmo tempo em que melhora a alocação e o uso dos recursos naturais, permitindo ganhos de produtividade aliados a uma utilização mais eficiente desses recursos.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa é de natureza básica e adota uma abordagem quantitativa para a análise dos dados. E foi desenvolvida em dois estágios: I) cálculo do índice composto utilizando o método de Análise de Componentes Principais (PCA) e o método do *Benefit of the Doubt* (BOD) formulado a partir da Função de Distância Direcional (DDF), em seguida foi feito uma comparação entre os *rankings* dos dois métodos utilizando as medidas de correlação de Spearman e Kendall; e II) aplicação do método de análise regressão Tobit para verificar os efeitos de fatores exógenos no índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano.

O uso do procedimento em dois estágios é uma prática comum na literatura, no primeiro estágio, no cálculo dos índices compostos e, no segundo estágio, os índices obtidos são utilizados como variável dependente em outras técnicas, que pode ser o modelo de regressão de Mínimos Quadrados Ordinários, modelo de regressão Tobit ou técnica de *Bootstrap*, entre outras opções, a critério do pesquisador. Isso com o intuito de verificar o efeito de variáveis exógenos (ou ambientais) sobre o índice calculado.

A escolha dos métodos apresentados e das variáveis utilizadas na elaboração do índice composto baseia-se na revisão teórica e empírica apresentada no capítulo 2, que revelou uma série de variáveis e modelos possíveis para avaliar o desempenho econômico e sustentável de uma região.

A revisão empírica (seção 2.5) mostrou uma série de métodos possíveis para mensurar índices compostos, sendo os mais comuns o modelo *Benefit of the Doubt*, a Análise de Componentes Principais e o Modelo de Processos Hierárquicos. A nível internacional é comum a aplicação do modelo *Benefit of the Doubt*, e no âmbito nacional do modelo de Análise de Componentes Principais. Ambos os modelos são robustos e consistentes, sendo amplamente utilizados na elaboração de índices compostos em diferentes áreas de pesquisa. Inclusive, esses métodos são sugeridos pela OCDE (2008) para calcular índices compostos.

Conforme o manual da OCDE (2008), o modelo do *Benefit of the Doubt*, em especial, é um procedimento interessante de ponderação e agregação, pois reduz a subjetividade associada à determinação dos pesos. Nesse modelo, não é necessário definir pesos para os indicadores; o próprio modelo determina a melhor combinação de pesos para eles. Por ser uma abordagem não paramétrica, esse modelo não requer informações prévias sobre subindicadores ou

variáveis, podendo derivar um conjunto de pesos de forma endógena para todas as unidades avaliadas (Zanella; Camanho; Dias, 2015).

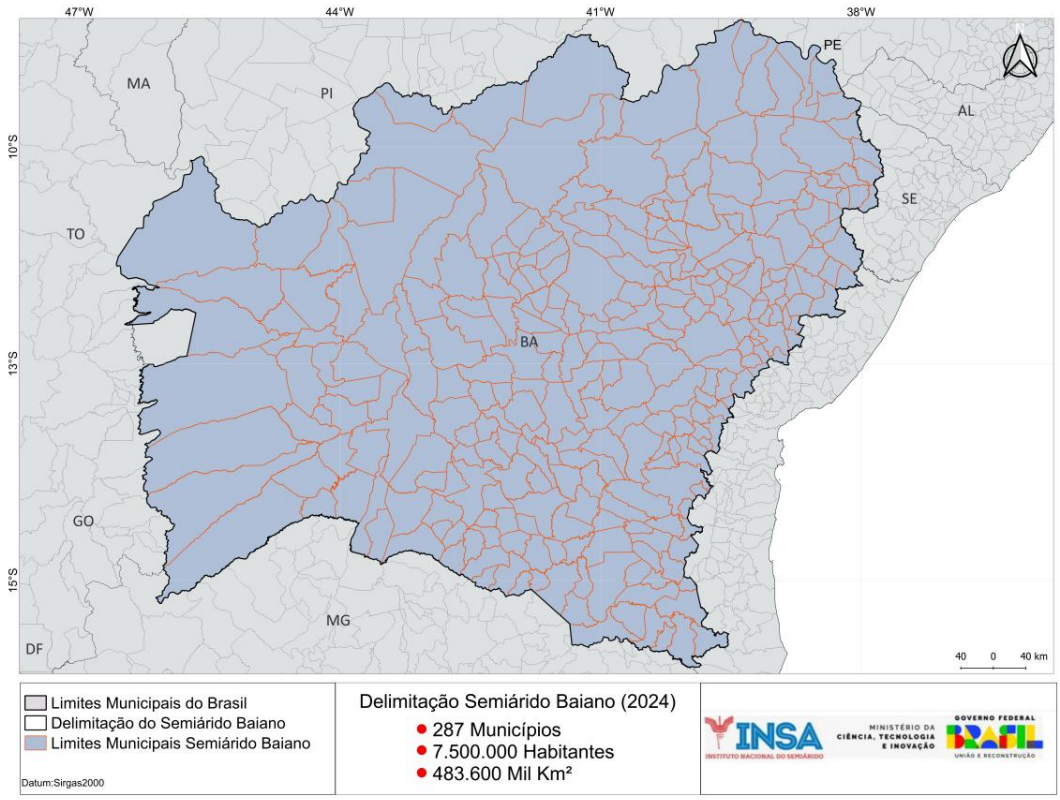
Os métodos utilizados serão detalhados ao longo deste capítulo.

3.1 Área de estudo

O estado da Bahia, além de possuir uma grande extensão territorial, abriga uma grande biodiversidade composta por três biomas: Mata Atlântica, Caatinga e Cerrado. O estado representa cerca de 40% da área total do semiárido brasileiro (Ventura, Fernández e Andrade, 2013). Na Bahia estão 19% dos municípios incluídos na delimitação semiárida nacional.

O semiárido baiano (Figura 2) é composto por 287 municípios (69% do estado) e tem uma população estimada de 7,5 milhões de pessoas, ocupando uma área superior a 483 mil quilômetros quadrados. A região possui clima tropical semiárido e se caracteriza por possuir altas temperaturas, em geral superiores a 25 ºC, e por um baixo nível de precipitação pluviométrica, com chuvas escassas e irregulares ao longo do ano. Esta região enfrenta longos períodos de seca, o que compromete a disponibilidade de água, afeta a agricultura e traz sérios desafios socioeconômicos e ambientais.

Figura 2: Localização geográfica do semiárido baiano, 2023



Fonte: INSA, 2024.

Segundo dados da Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia – SEI (2021), o PIB do semiárido baiano em 2021 foi de R$ 140,5 bilhões. A atividade de comércio e serviço representava 62,1% desse valor. A agropecuária, com destaque para a produção de leite, carne e frutas, representava 19,7% do PIB, sendo uma das principais fontes de subsistência e geração de renda para a população rural. A indústria, por sua vez, responde por 18,2% do PIB, com destaque para a extração mineral e a produção de energias renováveis, como a solar e a eólica, que têm se expandido na região devido ao alto potencial de irradiação solar e de geração de ventos. As atividades agropecuárias e de extração vegetal em (2022) representavam 61,3% do estoque de emprego formal do semiárido baiano.

Conforme Ventura, Fernández e Andrade (2013), o semiárido é uma região conhecida por suas fragilidades ambientais e socioeconômicas, sendo uma das áreas mais secas do Nordeste. Assim como para os demais estados nordestinos, as secas intensas e recorrentes na Bahia trazem consigo diversas consequências sociais, econômicas e ambientais, como a falta de água, perdas de cultivo e de biodiversidades. No entanto, o estado tem grande potencial, especialmente para a atividade agrícola, como se pode observar na faixa Oeste do estado, importante fronteira agrícola nacional, com crescimento exponencial da produção de grãos, que tem se convertido em geração de emprego e renda para a região.

A agropecuária é uma importante fonte de geração de emprego e renda para a região do semiárido baiano, sendo a principal fonte de subsistência para 77% dos estabelecimentos rurais (Censo Agropecuário, 2017). A atividade agropecuária é bastante expressiva no semiárido baiano, com destaque para a região de Juazeiro, grande polo da agricultura irrigada, cuja utilização de tecnologias avançadas de irrigação permite uma agricultura altamente produtiva; e para a região Extremo Oeste da Bahia, grande produtora de grãos cultivados em grandes propriedades, com técnicas modernas de cultivo e mecanização. E nas demais localidades com forte participação da agricultura de pequena escala, com pequenos produtores cultivando no formato de agrícola de sequeiro.

O recorte geográfico da região do semiárido brasileiro é definido pelo Conselho Deliberativo da Sudene, que leva em consideração três importantes critérios: (i) precipitação média anual igual ou inferior a 800 mm; (ii) índice de aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50; e (iii) déficit hídrico diário igual ou superior a 60% considerando todos os dias do ano (Sudene, 2017).

No semiárido baiano, predomina o bioma Caatinga, que é detentor de uma extensa variedade de espécies nativas e possui características únicas, que o tornam um bioma exclusivamente brasileiro (Ribeiro *et al.,* 2016). São mais de onze mil espécies catalogadas de plantas e uma grande diversidade de animais (1.307), sendo que 25% deles são exclusivos da Caatinga (INSA, 2023). A Caatinga é uma das vegetações mais sensíveis às mudanças climáticas no mundo (Niemeyer; Vale, 2022). Dominado por espécies vegetais arbóreas e arbustivas, o bioma é composto por plantas espinhosas e herbáceas, que perdem suas folhas durante o período de seca. Esse é um mecanismo natural das plantas para sobreviver aos longos períodos de estiagem, características típicas do bioma Caatinga (Queiroz *et al*., 2021).

Os intensos períodos de seca são uma característica marcante da região do semiárido baiano e acontecem com grande frequência. De acordo com estudos sobre alterações climáticas, é bem provável que secas mais prolongadas e temperaturas mais elevadas se tornem comuns nas regiões áridas e semiáridas. Esse cenário pode reduzir o habitat de espécies endêmicas, afetar serviços ecossistêmicos essenciais, como a disponibilidade de água, e gerar perdas na produtividade agrícola e pecuária. Isso, pode provocar grande impacto socioeconômico para a população local, forçando o êxodo rural em busca de melhores condições de vida nos grandes centros urbanos (Marengo; Cunha; Alves, 2016; Niemeyer; Vale, 2022).

Tendo um panorama geral sobre a região de estudo, as próximas seções apresentarão as etapas metodológicas para a construção do índice proposto.

3.2. Cálculo do Índice Composto de Sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano

3.2.1. Etapas da construção do índice composto

O índice composto proposto neste estudo foi construído com base nas etapas indicadas no manual da OCDE (2008). Optou-se por seguir esse protocolo porque ele permite o desenvolvimento de uma abordagem mais abrangente e flexível, englobando diferentes aspectos a partir dos quais a sustentabilidade rural é avaliada.

Para formar uma única medida de desempenho é preciso agregar uma variedade de subindicadores individuais. A vantagem dessa agregação é que os índices compostos podem refletir critérios multidimensionais em uma única medida, sem perdas significativas de informação e com fácil interpretação dos resultados. Um único indicador é mais fácil de ser

interpretado do que um conjunto de muitos indicadores individuais, o que facilita a comunicação com o público em geral e com toda a comunidade interessada, incluindo os agricultores, principais agentes responsáveis por realizar a sustentabilidade rural (Dong; Mitchell; Colquhoun, 2015).

Além disso, o índice composto permite classificar diferentes entidades de acordo com sua posição no *ranking*. Neste sentido, os indicadores compostos são relevantes para a implementação, melhoria e monitoramento de políticas públicas, bem como para a formulação de novas estratégias. Eles também possibilitam a comparação do desempenho de diferentes regiões no tempo e no espaço (Fusco, 2023).

No relatório da OCDE são sugeridas 10 etapas para a construção de índices compostos, quais são:

1. Construção do arcabouço teórico: Nesta etapa é construída a base teórica e empírica que dá sustentação à construção metodológica do estudo. Para isso, neste estudo, realizaram-se buscas nas principais bases de dados científicas com acesso gratuito, como: *scielo*, *google acadêmico, scorpus*. Nas buscas utilizou-se as seguintes palavras chaves: "sustentabilidade" "sustentabilidade agrícola", "desenvolvimento sustentável no meio rural", tanto em âmbito

2. Seleção de indicadores base: Nesta etapa são escolhidos os indicadores individuais que formarão o índice composto. Essa seleção é feita com base na etapa anterior e é importante estar atento à seleção desses indicadores para que ela seja precisa e condizente com o objetivo da pesquisa, garantindo que o índice final represente da forma mais fiel possível a realidade. Os indicadores escolhidos para este estudo estão descritos no Quadro 1.

3. Imputação de dados ausentes: Nesta etapa é realizada a imputação de dados ausentes quando a base de dados apresentar dados faltantes. É comum que bases de dados tenham informações ausentes e, para evitar a exclusão de unidades da análise, recomenda-se a aplicação de métodos de imputação apropriados ao estudo. A literatura oferece diversas abordagens, cabendo ao pesquisador escolher a mais adequada ao seu estudo. Nesta pesquisa, a imputação não foi necessária, como se trabalhou predominantemente com valores totais, não houve problemas de ausência de dados, todos estavam completos. No entanto, na estimação do modelo DEA-BOD, valores iguais a zero foram substituídos por um valor muito pequeno (0,0001), a fim de evitar problemas numéricos decorrentes das restrições de pesos impostas no modelo.

4. Análise exploratória: Nesta etapa é feita uma análise exploratória descritiva das variáveis para compreender a estrutura geral dos indicadores, avaliar a adequação do conjunto de dados e explicar as escolhas metodológicas, como ponderação e agregação.

5. Normalização de dados: Nesta etapa os indicadores são normalizados para que sejam comparáveis. É importante estar atento aos valores extremos, pois eles podem influenciar as etapas seguintes e gerar *benchmarking* artificiais. Para o modelo PCA os dados foram padronizados para terem média 0 e variância igual a 1 (equação 2), para evitar que dados em diferentes escalas ou com maior variação influencie o índice final. No modelo DEA-BOD não foi adotado nenhum procedimento de padronização dos dados, todos foram utilizados na sua forma original, essa é uma vantagem dos modelos DEA, pode ser trabalhado com dados em diferentes escalas de medidas.

6. Ponderação e agregação: Nesta etapa definem-se os métodos de agregação e ponderação dos dados, tendo como base a estrutura teórica e empírica definida na etapa 1. Neste estudo, seguiram-se as recomendações do relatório da OCDE (2008) para definir os métodos de agregação e ponderação. Como método de ponderação, adotaram-se a Análise de Componentes Principais (PCA) e o modelo *Benefit of the Doubt* (BOD) formulado a partir da Função de Distância Direcional (DDF) (doravante DEA-BOD de distância direcional). Como método de agregação, adotou-se o método aditivo. O método aditivo admite total compensabilidade dos dados, ou seja, um desempenho ruim em uma dimensão pode ser perfeitamente compensado por um bom desempenho em outra, de modo que as unidades de tomadas de decisão sejam sempre avaliadas da melhor maneira possível.

7. Análises de robustez e sensibilidade: Nesta etapa são aplicados testes e procedimentos para avaliar a robustez do índice composto. Foram realizadas análise de correlação, teste KMO e testes de restrições de pesos de cada indicador de (1%, 2%, 3%, 4% e 5%) no modelo DEA-BOD de distância direcional. Para o modelo DEA-BOD de distância direcional optou-se pela restrição de pesos de 2%, para não tornar o modelo excessivamente restrito e muito exigente para as unidades avaliadas.

8. Análise da relação entre os índices calculados e os dados originais: Nesta etapa é realizada uma análise de correlação dos dados originais e do índice calculado para identificar quais indicadores que mais influenciam o índice.

9. Análise da relação dos índices calculados com outras variáveis: Nesta etapa é verificado o efeito de outras variáveis ou fatores exógenos no índice. Neste estudo adotou-se a técnica de análise de regressão Tobit para verificar o efeito de fatores exógenos no índice de sustentabilidade. A escolha da regressão Tobit se deve à característica truncada do índice calculado, que é limitado a valores entre 0 e 1.

10. Apresentação e difusão dos resultados: Nesta etapa são apresentados os resultados alcançados, que foram compilados por meio de mapas, tabelas e gráficos para facilitar a sua interpretação e visualização.

Essas etapas são descritas nas seções subsequentes.

3.3 Seleção de Indicadores de Sustentabilidade

Com base no arcabouço teórico e empírico, seções 2.1 a 2.5, selecionou-se um conjunto de indicadores que refletem aspectos das três dimensões que formam o tripé da sustentabilidade: econômica, social e ambiental, para avaliar o desempenho sustentável dos municípios do semiárido baiano.

Ressalta-se que o índice proposto neste estudo dá ênfase à questão ambiental em um contexto rural, sendo os indicadores analisados coletados especificamente para esse contexto, de forma a representar, de maneira abrangente, a estrutura multidimensional da sustentabilidade ambiental rural dos municípios do semiárido baiano. O período escolhido foi aquele em que se encontraram dados disponíveis de forma gratuita para o nível municipal.

As bases de dados consultadas foram: Instituto Brasileiro de Geografia Estatística, Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, Pesquisa da Pecuária Municipal, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais,Censo Agropecuário de 2017, Mapbiomas e Ministério da Saúde. Dessa forma, o índice gerado reflete apenas a década de 2020, uma vez que as variáveis utilizadas abrangem exclusivamente esse período de 2010 a 2020. O fato de ser ter variáveis em medidas em diferentes anos não compromete os resultados da pesquisa, visto que mudanças estruturais demandam tempo para produzir efeitos significativos. Todas as variáveis foram coletadas para os 287 municípios que compõem o semiárido baiano.

Quadro 1: Indicadores de sustentabilidade: descrição e significado

Dimensão	Indicador	Descrição e significado	Fundamentação teórica	Fonte
Social	Proporção de alfabetizados	Número de produtores que sabe ler e escrever dividido pelo total de produtores	Abreu, Nunes e Mesias (2019); Moura e Sousa (2020); Ferreira, Branchi e Oliveira (2024);	Censo Agropecuário de 2017
	Médicos por habitantes	Número de médicos dos municípios dividido pelo total de habitantes	Abreu, Nunes e Mesias (2019); Penabad, Casal e Ares (2022); Abdar *et al.* (2022)	Ministério da Saúde
Econômica	Razão de pessoas ocupado	Número de estabelecimentos agropecuários com pessoal ocupado dividido pelo total de pessoas ocupadas em estabelecimentos agropecuários	Martínez *et al.* (2020); Reig-Martínez, Gómez-Limón e Picazo-Tadeo (2016)	Censo Agropecuário de 2017
	Valor da produção por pessoa ocupada	Valor da produção de estabelecimentos agropecuários dividido pelo total de pessoas ocupadas em estabelecimentos rurais.	Magrini e Giambona (2022); Abdar *et al.* (2022)	Censo Agropecuário de 2017
	Valor da produção por área	Valor da produção de estabelecimentos agropecuários dividido pela área em hectares dos municípios.	Souza (2019)	Censo Agropecuário de 2017
	Valor da produção por CO2	Valor da produção de estabelecimentos agropecuários divido pelo total de emissões de CO2 acumuladas de 2000 a 2020.	"-"	Censo Agropecuário de 2017
	Proporção de comercialização	Número de estabelecimentos agropecuários cuja finalidade principal da produção é a comercialização dividido pelo total de estabelecimentos rurais.	Reig-Martínez, Gómez-Limón e Picazo-Tadeo (2016)	Censo Agropecuário de 2017
Ambi-	Proporção de práticas sustentáveis	Número de estabelecimentos rurais que adotam algum tipo de prática agrícola sustentável em sua	Moura e Sousa (2020); Moura e Campos (2022); Lobão e Staduto (2019)	Censo Agropecuário de 2017

		propriedade em relação ao total de estabelecimentos rurais.		
	Proporção de lavoura	A área (hectares) dos estabelecimentos rurais destinada ao cultivo de lavouras temporárias, permanentes e flores em relação à área total de uso da terra.	Fernández Martínez *et al.* (2020); Lobão e Staduto (2019)	Censo Agropecuário de 2017
	Mata e sistemas	Soma da área coberta com matas naturais, plantadas e a produção de sistemas agroflorestais (hectares) em relação à área total de uso da terra.	Penabad, Casal e Ares (2022); Fernández Martínez *et al.* (2020); Abdar *et al.* (2022)	Censo Agropecuário de 2017
	Razão de recursos hídricos	Soma de todos os tipos de recursos hídricos (nascentes, rios, poços e cisternas), dividido pelo total de estabelecimentos.	Ferreira, Branchi e Oliveira (2024)	Censo Agropecuário de 2017
	Proporção de área de lâmina d'água	A área (hectares) de lâmina d'água dos estabelecimentos em relação à área total de usos das terras.	Fernández Martínez *et al*., (2020)	Censo Agropecuário de 2017
	Emissões área	Total de emissões de CO2 acumuladas de 2000 a 2020, dividido pela área em hectares dos municípios.	Sueyoshi e Yuan (2017); Magrini e Giambona (2022); Abdar *et al.* (2022)	SEEG
	Desmatamento	Soma das áreas desmatadas de 2001 a 2020 dividido pela área dos municípios.	Staduto, Orlandi e Chioveto (2018)	INPE
	Proporção de pastagens degradadas	Total de pastagens degradadas dividido pelo total de áreas de pastagens.	"-"	LAPIG
	Razão de área antrópica	Soma do total de áreas antrópicas de 2000 a 2020 dividido pela área total dos estabelecimentos em 2017.	"-"	MAPBIOMAS
	Intensidade de animais	Quantidade de animais por hectares. TLU = bovino*0,7 + caprino*0,1+ovino*0,1	Martínez *et al.* (2020) ; Abdar *et al.* (2022)	PPM

Fonte: Dados da pesquisa, 2025. Nota: "-" contribuição do estudo.

Conforme o quadro 1, a base de dados deste estudo conta com 17 indicadores distribuídos em três dimensões. Dentre os indicadores coletados, cinco são indesejáveis, refletindo as externalidades negativas do próprio processo produtivo. Esses indicadores foram selecionados para contabilizar a pressão que a ação humana exerce sobre o meio ambiente, são eles: 1) desmatamento; 2) proporção de pastagens degradadas; 3) proporção de animais por área; 4) emissões de CO2 por área e 5) proporção de área antrópicas.

Em síntese, neste estudo busca-se avaliar a sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano na presença de fatores desejáveis e indesejáveis. E aqui destaca-se um grande avanço deste estudo em relação aos demais, pois ao incorporar o modelo DEA-BOD de distância direcional foi possível avaliar a sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano aumentando os fatores desejáveis ao mesmo tempo que reduz os indesejáveis. Pois o modelo do *Benefit of the Doubt* formulado a partir Função de Distância Direcional (DDF), permite ao mesmo tempo a expansão de *outputs* desejáveis e a contração de *outputs* indesejáveis, esse modelo está detalhado na seção 3.4.4.

Tradicionalmente, os estudos focam apenas em fatores desejáveis, e quando são incluídos fatores indesejáveis esses são inseridos com seus valores normalizados, modificando o valor natural do dado. Ao trabalhar com o modelo DEA-BOD de distância direcional, esse estudo avança em relação aos demais ao trabalhar com fatores desejáveis e indesejáveis sem adotar procedimentos de normalização (os dados são inseridos no modelo com seus valores reais). Isso permite uma avaliação mais completa e realista da sustentabilidade rural nos municípios do semiárido baiano. Com este índice, espera-se fornecer subsídios para a adoção de estratégias que possam reduzir os impactos negativos e aumentar os aspectos positivos, promovendo um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável na região.

3.4 Métodos de ponderação e agregação adotados no cálculo de índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano

A etapa de ponderação e agregação é uma das mais importante na elaboração de índices compostos, pois os pesos atribuídos aos indicadores refletem a sua importância relativa e as suas contribuições para avaliação do desempenho.

No manual para a elaboração de índices compostos, publicado pela OCDE em 2008, são elencados alguns métodos de ponderação e agregação que podem ser perfeitamente aplicados na elaboração de índices compostos. As técnicas de ponderação se dividem em: positivas e

normativas. As técnicas positivas são aquelas que permitem obter os pesos dos indicadores base por meio de procedimentos estatísticos e matemáticos, sem ter que incluir julgamentos de valor ou opiniões de sua importância relativa. Entre essas técnicas tem-se a Análise de Componentes Principais (PCA), Análise Envoltória de Dados (DEA) e análise de regressão. Já as técnicas normativas são aquelas que atribuem pesos diferentes aos indicadores em função da opinião de especialistas e tomadores de decisão externos.

A escolha entre os diferentes métodos possíveis pode influenciar os resultados do índice composto. Por esse motivo, optou-se, neste estudo, por empregar duas técnicas de ponderação: 1) a Análise de Componentes Principais (PCA) e 2) o modelo *Benefit of the Doubt* formulado a partir da Função de Distância Direcional.

A técnica de ponderação baseada em PCA nos permite definir os pesos dos indicadores com base nas intercorrelações entre esses indicadores*,* explicada na seção 3.4.1. Já no modelo DEA-BOD de distância direcional os pesos são definidos de forma endógena comparando as variáveis analisadas numa perspectiva relativa às variáveis de todo o conjunto de dados. Tecnicamente, esse método busca o conjunto de pesos "mais favorável", permitindo a obtenção de pesos mais adequados para cada unidade avaliada. São atribuídos pesos maiores às variáveis nas quais a DMU (Unidades Tomadoras de Decisões) em análise apresenta melhor desempenho e um peso menor às variáveis nas quais a DMU apresente baixo desempenho. Assim, cada DMU é avaliada com os pesos que mais a favoreçam na avaliação de desempenho, evitando o uso de um único sistema de pesos que poderia desfavorecer uma DMU ou outra. Deste modo, são determinados pesos ótimos de tal forma que o indicador composto resultante seja maximizado. Isso é essencialmente relevante quando não se tem conhecimento prévio da forma funcional e compreensão da importância das variáveis estudadas, tomando como base uma forma totalmente não paramétrica para evitar qualquer tipo de viés de especificação (D'Inverno De Witte, 2020; Lavigne *et. al*, 2019; Karagiannis, 2017).

A descrição detalhada dos modelos PCA e DEA-BOD de distância direcional é apresentada nas seções 3.4.1 e 3.4.4, respectivamente**.**

3.4.1 Análise de Componentes Principais (PCA)

A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica estatística muito utilizada na literatura para o cálculo de índices compostos (Melo; Parré, 2007; Conterato; Schneider; Waquil, 2007; Stege; Parré, 2013; Souza, 2019, Silva *et al*., 2018; Lobão; Staduto, 2018; Moura;

Sousa, 2020; Moura; Campos, 2023), dada a sua capacidade de agrupar informações contidas em um conjunto grande de variáveis em poucos fatores, chamados *componentes principais,* que são combinações lineares das variáveis originais.

O método PCA foi descrito inicialmente por Pearson (1901) e aprimorado por Hotelling (1933, 1936) (Hongyu; Sandanielo; Oliveira Junior, 2015). Essa técnica permite agrupar municípios ou variáveis com base em sua variação ou variâncias, ou seja, de acordo com o comportamento observado dentro de uma população.

O objetivo da PCA é explicar a estrutura de variância e covariância por meio de combinações lineares não correlacionadas das variáveis originais. Isso significa que, mesmo que se possua um conjunto de Q variáveis, $x_1, x_2, ..., x_Q$, grande parte da sua variação pode ser explicada por um conjunto menor de variáveis Z, chamadas componentes principais, $Z_1, Z_2, ..., Z_Q$, não correlacionadas.

$$Z_j = a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + ... + a_{ij}x_j \qquad \text{para } j = 1, 2, ..., Q \tag{1}$$

Os pesos a_{ij} (também chamados de cargas de componentes ou fatores) aplicados as variáveis x_Q na equação 1 são escolhidos de modo que os componentes principais Z_j sejam não correlacionados (ortogonais) e o primeiro componente carregue a maior parte da variância explicada do conjunto Q de variáveis, o segundo, a segunda maior variância explicada e assim sucessivamente, até que o último dos componentes principais absorva toda a variância restante não contabilizada pelos componentes anteriores. Neste caso, os pesos são atribuídos de forma a garantir que a maior parte da variância dos indicadores seja carregada no primeiro componente principal (Libório *et. al*, 2022).

Os componentes principais gerados são não correlacionados e, isso, é uma característica importante dos componentes, pois ela indica que eles estão medindo diferentes dimensões dos dados. E se o objetivo do estudo for sintetizar um conjunto maior de variáveis X em um pequeno número de variáveis Z não correlacionadas, o modelo PCA é particularmente adequado. No entanto, nem sempre o modelo PCA poderá ser aplicado com esse objetivo, por exemplo, se as variáveis originais não forem correlacionadas, o modelo PCA não é adequado, porque não será possível reduzir um número maior de variáveis em poucos componentes principais. Por outro lado, uma redução significativa das variáveis poderá ser obtida quando elas forem altamente correlacionadas (OCDE, 2008).

O modelo PCA parte de uma matriz de dados de ordem n x Q, usualmente denominada de matriz "Q" e cada linha X_i representa uma observação e cada coluna corresponde a uma variável. Essa matriz de dados representa as características X_Q observadas de n indivíduos de uma dada população. As características da população são representadas pelas variáveis X_1, X_2, X_3,...,X_Q, tal que $X_i \in$ R.

$$Q = \begin{bmatrix} X11 & X12 & X13 & \dots & X1Q \\ X21 & X22 & X23 & \dots & X2Q \\ X31 & X32 & X33 & \dots & X3Q \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Xn1 & Xn2 & Xn3 & \dots & XnQ \end{bmatrix}$$

Em termos práticos, o modelo PCA transforma as Q variáveis da matriz em Z_j componentes não correlacionados que representem a maior parte das informações dos dados originais sem perda significativa de informações usando técnicas de transformação linear. O novo conjunto de variáveis Z (com $Z<X$) irá compor o índice e representar a sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano.

Como normalmente as variáveis possuem unidades de medidas diferentes é preciso padronizar as variáveis X_Q para que elas tenham média 0 e variância igual a 1. A padronização segue a seguinte formulação:

$$Z_{Qn} = \frac{XQn - \overline{Xn}}{S\,(XQ)},\ Q = 1, 2, 3, \dots, X_Q, \text{ e } n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Em que, $\overline{Xn}$ e S (x_Q) são, respectivamente, a estimativa da média e o desvio padrão das variáveis Q, Z_{Qn} é a variável padronizada do município n e X_{Qn} é a variável a ser padronizada do município n. Depois de padronizados, obtêm-se uma nova matriz Z de dados. Ao executar este procedimento de normalização, elimina-se a influência das diferentes escalas e unidades das variáveis no componente principal. Sem esse procedimento de normalização, as variáveis com maior variância podem ter mais influência nos componentes principais, o que pode distorcer os resultados se as variáveis não estiverem na mesma escala. Desta forma, garante-se que todas as variáveis tenham a mesma contribuição na análise, independentemente de suas unidades ou variâncias originais.

$$Z = \begin{bmatrix} Z11 & Z12 & Z13 & \dots & Z1Q \\ Z21 & Z22 & Z23 & \dots & Z2Q \\ Z31 & Z32 & Z33 & \dots & Z3Q \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Zn1 & Zn2 & Zn3 & \dots & ZnQ \end{bmatrix}$$

Mas, para isso é preciso calcular a matriz "*S*" de covariância e a matriz "*R*" de correlação. A matriz *S* é uma matriz simétrica de ordem *p x p*.

$$S = \begin{bmatrix} Var(x1) & Cov(x1x2) & Cov(x1x3) & \dots & Cov(x1xQ) \\ Cov(x2x1) & Var(x2) & Cov(x2x3) & \dots & Cov(x2xQ) \\ Cov(x3x1) & Cov(x3x2) & Var(x3) & \dots & Cov(x3xQ) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(xQx1) & Cov(xQx2) & Cov(xQx3) & \dots & Var(xQ) \end{bmatrix}$$

Os componentes gerados pelo método PCA retêm o máximo possível da variação presente nos dados originais, explicando o comportamento das variáveis de forma simplificada, reduzida e com a menor perda de informação possível. E, ao final, obtém-se um número mínimo de componentes necessários para explicar a proporção máxima da variância total, o que facilita a interpretação dos resultados (Hair, 2009). Nesse modelo, os pesos de cada índice são determinados com base na contribuição de cada componente para a variância explicada, evitando a influência de fatores subjetivos nos resultados da pesquisa.

Além de reduzir a dimensionalidade dos dados, o método PCA permite identificar as variáveis que mais contribuem para os primeiros componentes e, consequentemente, quais variáveis deveriam ser priorizadas ou que são mais relevantes naquele contexto.

No quadro a seguir são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do modelo PCA para a elaboração de índices compostos. Dentre as vantagens, destaca-se a redução da dimensionalidade do conjunto de dados originais, que sem dúvida é uma das principais contribuições desse método.

Quadro 2: Descrição das vantagens e desvantagens do modelo PCA

Vantagens	**Desvantagens**
Sintetiza um conjunto maior de indicadores individuais em poucos componentes, preservando a proporção máxima possível da variação total no conjunto de dados original.	Sensível a modificações nos dados básicos: revisões e atualizações de dados.
Atribui as maiores cargas fatoriais aos indicadores individuais que apresentam maior variação entre as DMUs, facilitando comparações entre DMUs.	Sensível à presença de outliers, que podem distorcer os dados.
As correlações não representam necessariamente a influência real dos indicadores individuais no fenômeno analisado.	Sensível a problemas de pequenas amostras, o ideal é que tenha um conjunto grande de variáveis.
	Minimiza a contribuição de indicadores individuais que não se

	correlacionam com outros indicadores individuais.

Fonte: OCDE, 2008.

Como destacado por Gan *et. al* (2017) em seu estudo, o modelo PCA é uma técnica de redução de dimensionalidade. Portanto, usar esse modelo para atribuir pesos a indicadores em avaliações de sustentabilidade pode não ser o mais adequado, pois as dimensões extraídas podem agrupar indicadores que não têm uma conexão clara no mundo real. Por exemplo, no modelo PCA, os pesos são baseados nas correlações entre os indicadores e não necessariamente na sua importância no mundo real. Como resultado, um indicador importante pode receber um peso baixo simplesmente porque não está fortemente correlacionado com os outros, gerando pesos inadequados ou inválidos. Com isso, muitos indicadores importantes, mas pouco intercorrelacionados, podem não ser representados pelo índice composto.

Outro ponto importante destacado por Mazziotta e Pareto (2018) diz respeito à comparabilidade interespacial e temporal do modelo PCA. Esse método não permite a comparação, uma vez que a variância e os pesos calculados pelo método PCA mudam para cada matriz de dados e, portanto, os resultados de diferentes análises não são facilmente comparáveis. Isso pode representar um grande problema caso o índice composto precise ser calculado e avaliado ao longo do tempo.

Portanto, pesos baseados unicamente nas correlações entre os indicadores podem não refletir a verdadeira relevância desses indicadores, o que não parece coerente em avaliações de sustentabilidade, onde fatores ambientais são cruciais. Por isso, neste estudo foi aplicado também o método DEA-BOD de distância direcional com restrição de pesos, nele, os pesos são definidos de forma endógena, sendo atribuída a melhor combinação de pesos independentemente da existência de correlações.

A adequabilidade do conjunto de dados ao modelo PCA foi verificada pelos testes Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de Esfericidade de Bartlett. O teste KMO, calculado pela razão entre o quadrado das correlações totais e o quadrado das correlações parciais, avalia se o conjunto de dados é adequado para a aplicação do modelo PCA. Seu resultado varia de 0 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam um ajuste mais adequado dos dados, enquanto valores próximos de 0 sugerem que o modelo PCA não é apropriado para o conjunto de dados utilizado (HAIR, 2009). Nesta etapa, foram eliminadas as variáveis que apresentaram no teste KMO valores inferiores a 0,5.

Já o teste de Esfericidade de Bartlett verifica se a matriz de correlação apresenta correlações significativas entre pelo menos algumas das variáveis. Como o modelo PCA requer a presença de correlações entre as variáveis, espera-se rejeitar a hipótese nula de que as variáveis não são intercorrelacionadas (HAIR, 2009). O resultado do teste de Bartlett deve ser estatisticamente significante ($p<0,05$) para que a análise PCA seja viável.

Verificada a adequabilidade do conjunto de dados ao modelo PCA, estimaram-se os autovetores e autovalores e, em seguida, definiu-se o número de componentes que devem ser retidos. Neste estudo, utilizou-se o critério de Kaiser, que indica que deve ser retidos os componentes com autovalor maior que 1.

Em seguida, executou-se o procedimento de rotação ortogonal dos componentes. Ao fazer isso, pressupõem-se que cada componente é independente em relação aos demais. Neste estudo adotou-se o método *Varimax*, esse método garante que todos os componentes extraídos sejam independentes, proporcionando uma estrutura mais simples de interpretar e que tem a vantagem de melhorar a discriminação entre os componentes, evitando que muitas variáveis apresentem cargas elevadas em um único fator.

De posse dos componentes rotacionados, extraiu-se os scores dos componentes que foram utilizados no cálculo do índice composto, conforme equação 3.

$$IDS = \sum_{z=1}^{z=n} w_z f_z \tag{3}$$

Em que, IDS é o índice composto, w_z é a proporção da variância explicada de cada componente e f_z são os n escores fatoriais retidos. O resultado final foi normalizado pelo método *Min–Max*, de forma que o índice assumisse valores entre 0 (pior desempenho) e 1 (melhor desempenho).

Esse método de agregação admite total compensabilidade entre as dimensões, pois pressupõe-se que há independência preferencial entre os indicadores. Do ponto de vista prático, isso significa que a função de agregação aditiva permite avaliar a contribuição marginal de cada variável separadamente, e essas contribuições marginais são somadas para produzir um valor total (Talukder; Hipel; VanLoon, 2018).

A vantagem desse método de agregação está na simplicidade do cálculo e na facilidade de compreensão. Além disso, por esse método, a unidade de análise é sempre avaliada da melhor

forma já que, ao admitir compensabilidade entre os indicadores, um baixo desempenho em um indicador por ser perfeitamente compensado por um alto desempenho em outro.

A PCA foi executada usando o pacote *FactoMineR* e *Psych* no *software R-studio* e o *Microsoft Excel* de modo auxiliar para construção das tabelas.

3.4.2 Descrição do modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA) tradicional

O modelo DEA é uma técnica não-paramétrica baseada na programação linear que avalia um conjunto de unidades tomadoras de decisões (chamadas DMUs) utilizando múltiplos *inputs* (entradas) e *outputs* (saídas) em um ambiente incerto, onde não são conhecidos os pesos associados a cada uma dessas variáveis. O modelo DEA é computado *n* vezes, sendo executado um modelo de programação para cada município do conjunto de dados. De modo que cada município é destacado uma vez e avaliado em relação a todos os demais municípios da amostra.

Desenvolvido originalmente por Farrell (1957) e colocado em prática por Charnes; Cooper e Rhodes (1978), esse modelo mede a *eficiência relativa* das DMUs. Sendo a eficiência calculada pela razão entre a soma ponderada dos produtos e a soma ponderada dos insumos, conforme demonstrado na equação (4).

$$Max\ Eff = \frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj0}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij0}} \qquad (4)$$

$$s.t\ \frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj0}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij0}} \leq 1 \qquad j = 1, ..., n$$

$$u_r \geq 0 \qquad r = 1, ..., s$$

$$v_i \geq 0 \qquad i = 1, ..., m$$

Sendo que v_i, u_r os pesos dos *inputs* e *outputs*, *m* representa os *inputs* x_{ij} , *i* = 1, ..., *m*, *s* representa os *outputs* y_{rj}, *r* = 1, ..., *s* e *n* representa as DMUs, *j* = 1, ..., *n.* Este modelo possui duas restrições: i) os pesos devem ser maiores e iguais a zero (v_i, $u_r \geq 0$); ii) o escore de eficiência tem um limite máximo de 1. Sendo calculado para cada DMU um conjunto ótimo de pesos que maximiza os escores de eficiência, formando, para cada uma delas, um problema de otimização.

Assim, uma DMU só terá um escore de eficiência igual a 1 se a eficiência verificada for superior à eficiência calculada para as demais DMUs, ou seja, é considerada eficiente aquela

DMU que apresentar a menor ineficiência. Logo, as DMUs ineficientes terão valores proporcionalmente inferiores a 1.

Desse modo, por esse método, é possível identificar as DMUs eficientes e ineficientes, bem como direcionar estratégias capazes de transformar uma DMU ineficiente em uma DMU eficiente, por meio da determinação dos *benchmarks* (Mota, 2022).

Embora a formulação fracionária ofereça uma interpretação intuitiva da eficiência como uma razão ponderada entre *outputs* e *inputs*, sua natureza fracionária dificulta a resolução direta do problema. Para contornar essa limitação, Charnes, Cooper e Rhodes (1978) propuseram uma reformulação equivalente em termos de programação linear. Nessa abordagem, a soma ponderada dos *inputs* da DMU avaliada é normalizada para um valor fixo igual a 1, permitindo a maximização direta da soma ponderada dos *outputs*.

Assim, Charnes, Cooper e Rhodes (1978), buscando estimar a eficiência relativa de escolas públicas que pertenciam ao programa educacional em comparação as escolas que não pertenciam ao programa, transformaram o modelo de programação fracionário (4) em um modelo de programação linear (5):

$$Max \sum_{r=1}^{s} u_r \, y_{rj0} \qquad (5)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij0} = 1$$

$$\sum_{r=1}^{s} u_r \, y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_i \, x_{ij} \leq 0 \qquad j = 1, ..., n$$

$$u_r \geq 0 \qquad r = 1, ..., s$$

$$v_i \geq 0 \qquad i = 1, ..., m$$

Este modelo é orientado ao *input* com retornos constantes de escala (CRS – *Constant Returns to Scale*), denominado modelo CCR (cuja sigla faz referência às iniciais de seus autores). De modo que, cada variação nos insumos (*inputs*) leva a uma variação proporcional nos produtos (*outputs*). E a sua solução envolve a obtenção de valores para v_i, u_r (pesos) que maximizam a eficiência para cada unidade produtiva, respeitando as restrições. A partir de então, o método determina quais são as melhores práticas observadas, ou seja, quais as DMUs que apresentaram 100% de eficiência e formam a fronteira de eficiência. Por outro lado, se o resultado encontrado for menor que 1, isso indica que a unidade produtiva deve reduzir o

consumo de insumos para ser eficiente. Por isso, esse modelo é chamado de orientado aos *inputs* (Peña, 2008).

Um aspecto importante com relação aos modelos clássicos de DEA diz respeito a sua orientação, que pode ser: orientado aos *inputs* e aos *outputs.* Os modelos com orientação para os *inputs* visam minimizar os insumos disponíveis, mantendo constantes os produtos (resultados). Nos modelos orientados para os *outputs*, busca-se maximizar os produtos obtidos, mantendo constantes os insumos.

Embora os modelos de DEA clássicos sejam orientados a *inputs* ou a *outputs*, há extensões que permitem considerar simultaneamente a redução de insumos e o aumento de produtos, como nos modelos baseados nas funções de distância direcionais, as quais serão abordadas mais adiante.

No modelo CCR orientado ao *output*, o objetivo é maximizar as saídas mantendo as entradas constantes. Na forma linearizada, a função objetivo passa a ser minimizar a soma ponderada das entradas da DMU avaliada, conforme apresentado na equação (6). O resultado da função objetivo será maior ou igual a 1, indicando o quanto uma DMU pode expandir suas saídas mantendo os níveis de insumos constantes. A medida de eficiência é dada pelo inverso do valor da função objetivo.

$$Min \sum_{i=1}^{m} v_i \, x_{ij0} \qquad (6)$$

$$s.t. \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj0} = 1$$

$\sum_{r=1}^{s} u_r \, y_{rj}$ - $\sum_{i=1}^{m} v_i \, x_{ij} \leq 0$ $\qquad$ $j = 1, \ldots, n$

$u_r \geq 0$ $\qquad$ $r = 1, ..., s$

$v_i \geq 0$ $\qquad$ $i = 1, ..., m$

O modelo orientado ao *output* possibilita identificar o nível de produção possível de ser alcançado utilizando o mesmo nível de insumo disponível. Assumindo retornos constantes à escala, seus resultados devem ser equivalentes aos resultados do modelo com orientação aos *input*s. Desta forma, apenas as unidades que foram eficientes no modelo com orientação para os *inputs* serão eficientes no modelo orientado ao *output*.

Os modelos de programação linear demonstrados nas equações (5) e (6) são conhecidos como formulações multiplicadoras do modelo DEA. Pela dualidade, esses modelos podem ser resolvidos utilizando a formulação envolvente que é equivalente a formulação multiplicadora, conforme demostrados nas equações (7) e (8), respectivamente:

$$Min\ \delta \tag{7}$$

$s.t\ \sum_{j=1}^{n} \lambda_j\ x_{ij}\ \leq \delta\ x_{i0}$ $\quad i = 1, ..., m$

$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j\ y_{rj} \geq\ y_{r0}$ $\quad r = 1, ..., s$

$\lambda_j \geq 0$ $\quad j = 1, ..., n$

Na equação (7) tem-se o modelo orientado ao *input* e na equação (8) o modelo orientado ao *output.*

$$Max\ \theta \tag{8}$$

$s.t\ \sum_{j=1}^{n} \lambda_j\ x_{ij}\ \leq\ x_{i0}$ $\quad i = 1, ..., m$

$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j\ y_{rj}\ \geq\ \theta\ y_{r0}$ $\quad r = 1, ..., s$

$\lambda_j \geq 0$ $\quad j = 1, ..., n$

Posteriormente, o modelo desenvolvido por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) foi aprimorado por Banker, Charnes e Cooper (1984), que incorporaram no modelo retornos variáveis de escala (VRS - *Variable Returns to Scale*), substituindo o pressuposto de proporcionalidade pelo da convexidade. Esse modelo ficou conhecido pela sigla BCC (referindo-se às iniciais dos autores).

Ao assumir o pressuposto da convexidade, o modelo BCC permite que diferentes DMUs operem sob retornos variáveis de escala. Nesse contexto, uma DMU apresenta retornos crescentes de escala se puder aumentar proporcionalmente as saídas sem aumento equivalente nos *inputs*, retornos decrescentes de escala se um aumento proporcional de *outputs* demandaria um aumento mais que proporcional nos *inputs*.

$$Max\ \sum_{r=1}^{s} u_r\ y_{rj0} + \omega_* \tag{9}$$

$$s.t. \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij0} = 1$$

$\sum_{r=1}^{s} u_r\, y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_i\, x_{ij} + \omega_* \leq 0$ $j = 1, \ldots, n$

$u_r \geq 0,$ $r = 1, ..., s$

$v_i, \geq 0,$ $i = 1, ..., m$

ω_* é livre

No modelo BCC, a eficiência é dada como no modelo CCR, acrescido de um fator de escala ω_*, que indica o sentido dos retornos de escala. Se ω_* for positivo, a DMU opera com retornos crescentes de escala, se ω_* for negativo, a DMU apresenta retornos decrescentes de escala, e se for igual a zero, a DMU opera em retorno constante de escala (Filho, 2023).

Ao contrário do modelo CCR, no modelo BCC com retornos variáveis, os índices de eficiência se alteram dependendo da orientação escolhida, devido à convexidade da fronteira eficiente. O modelo BCC com orientação para os *outputs* tem a seguinte formulação:

$$Min\ \sum_{i=1}^{m} v_i\ x_{ij0} + \omega_* \qquad (10)$$

$$s.t. \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj0} = 1$$

$- \sum_{r=1}^{s} u_r\, y_{rj} + \sum_{i=1}^{m} v_i\, x_{ij}\ - \omega_* \geq 0$ $j = 1, \ldots, n$

$u_r \geq 0,$ $r = 1, ..., s$

$v_i, \geq 0,$ $i = 1, ..., m$

ω_* é livre

Do mesmo modo, o modelo BCC também pode ser resolvido utilizando a formulação envolvente, como apresentado nas equações (11) e (12) respectivamente.

$$Min\ \hat{\delta} \qquad (11)$$

$s.t\ \sum_{j=1}^{n} \lambda_j\, x_{ij} \leq \hat{\delta}\, x_{i0}$ $i = 1, ..., m$

$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j\, y_{rj}\ \geq y_{r0}$ $r = 1, ..., s$

$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$

$\lambda_j \geq 0$ $j = 1, ..., n$

Na equação (11) tem-se o modelo orientado ao *input* e na equação (12) o modelo orientado ao *output.*

$$Max\ \hat{\theta} \tag{12}$$

$s.t\ \sum_{j=1}^{n} \lambda_j\ x_{ij} \leq\ x_{i0}$ $\quad i = 1, ..., m$

$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j\ y_{rj} \geq\ \hat{\theta}\ y_{r0}$ $\quad r = 1, ..., s$

$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$

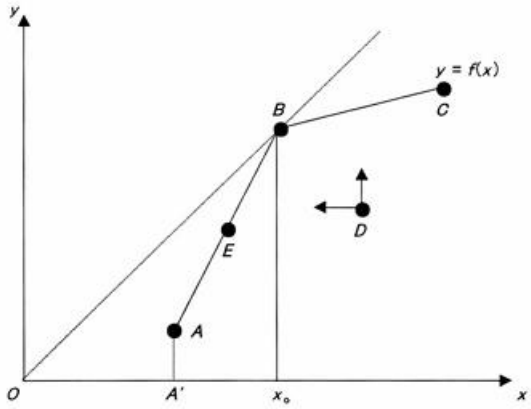
$\lambda_j \geq 0$ $\quad j = 1, ..., n$

Deste modo, na literatura, existem dois modelos básicos de DEA: o modelo CCR, que assume retornos constantes, e o modelo BCC, que considera retornos variáveis. Em ambos os modelos, uma fronteira de produção é construída com base nos dados originais, ao mesmo tempo em que se determina a distância de cada DMU em relação à sua respectiva fronteira de produção. Quanto mais próxima da fronteira de eficiência estiver uma DMU, mais eficiente ela será. Esses modelos fornecem uma medida de eficiência (pontuação) para cada uma das DMUs estudadas. Na sua forma mais básica, esses modelos assumem que existem *n* DMUs que utilizam *x* insumos para produzir *m* produtos (Aparicio; Kapelko; Monge, 2020).

Assim, neste modelo se estabelece uma "fronteira de eficiência", que é composta por um conjunto de DMUs que apresentam as melhores práticas. A partir da construção da fronteira atribui-se o nível de eficiência às outras unidades não fronteiriças com base na sua distância em relação a fronteira de eficiência (Haibo *et al.,* 2018). São consideradas eficientes as DMUs que apresentam a melhor relação entre os *outputs* ponderados e os *inputs* ponderados, estando situadas sobre a fronteira de eficiência. Já aquelas que estiveram abaixo da fronteira de eficiência são consideradas ineficientes.

A figura 3 ilustra o comportamento da fronteira de eficiência tanto pelo modelo com retornos constantes como com retornos variáveis de escala. No modelo CCR com retornos constantes de escala a fronteira de eficiência é representada por uma reta que parte da origem, passa pelo ponto B e segue uma trajetória crescente de modo constante. Já no modelo BCC, com retornos variáveis de escala, a fronteira de eficiência é uma curva envoltória convexa, composta por segmentos lineares com diferentes inclinações, refletindo retornos variáveis de escala.

Figura 3: Representação dos modelos CCR e BCC



Fonte: Cooper; Seiford; Tone, 2006.

Todos os pontos sobre a fronteira representam pontos de máxima eficiência. Deste modo, as DMUs A, B, C e E são consideradas eficientes, já a DMU D, situada abaixo da fronteira de eficiência, é considerada ineficiente, isso tanto pelo modelo CCR quanto pelo modelo BCC. Nota-se que, no modelo CCR, apenas a DMU B é eficiente, servindo de referência para todas as outras. Ao passo que, no segundo modelo mais DMUs são consideradas eficientes e servem de *benchmark* para as demais ineficientes.

Para se tornar eficiente, a DMU D deve projetar-se na fronteira de eficiência. Essa projeção pode ocorrer pela redução de seus insumos, mantendo os produtos constantes, ou pelo aumento de seus produtos, mantendo os insumos constantes.

No entanto, por não incorporar erros estocásticos, a fronteira de eficiência do modelo DEA tradicional fica suscetível a erros de medição. Além disso, por ser um método não paramétrico, é difícil submeter seus resultados a testes estatísticos, o que faz com que eles sejam específicos para o conjunto de dados analisados. Embora seja um excelente método para análise de eficiência relativa, ele é limitado em sua conversão para eficiência absoluta (Frio *et al.,* 2018).

3.4.3 Especificação do modelo *Benefit-of-the-Doubt* (DEA-BOD) tradicional

Partindo da abordagem tradicional proposta por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), estudos mais recentes adaptaram o modelo DEA tradicional para calcular índices compostos, com aplicações em diferentes áreas de pesquisa, incluindo: desenvolvimento rural sustentável (López-Penabad; Iglesias-Casal; Rey-Ares, 2022, Fernández Martínez *et al.*, 2020), gestão de

resíduos sólidos (Mergoni; D'Inverno; Carosi, 2022), índice de desenvolvimento humano (Mariano; Ferraz; Gobbo, 2021), índice de sustentabilidade (Tsaples *et al,* 2019), avaliação de sistemas de saúde (Vidoli; Fusco; Mazziotta, 2015) e índice de qualidade de vida (Morais; Camanho, 2011). Estes estudos avaliaram DMUs usando um conjunto de indicadores de saída desejáveis e uma única entrada fictícia igual a um para todas as DMUs.

A técnica de ponderação do *Benefit-of-the-Doubt* (DEA-BOD), inicialmente proposta por Cherchye *et al.* (2007), é uma adaptação do método Análise Envoltória de Dados (DEA), proposta por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), aplicada à construção de índices compostos. Sua particularidade é atribuir pesos de forma endógena, comparando as unidades (DMUs) em análise numa perspectiva relativa às demais unidades da amostra. Tecnicamente, esse método busca o conjunto de pesos "mais favorável", permitindo a obtenção de pesos mais adequados para cada unidade avaliada. São atribuídos pesos maiores às variáveis nas quais a DMU em análise apresenta melhor desempenho e um peso menor às variáveis nas quais a DMU apresente baixo desempenho. Assim, cada DMU é avaliada com os pesos que mais a favoreça na avaliação de desempenho, evitando o uso de um único sistema de pesos que poderia desfavorecer um município ou outro.

Deste modo, são determinados pesos ótimos de forma que o indicador composto resultante seja maximizado. Essa característica dos modelos baseados em DEA é especialmente útil quando não se tem conhecimento prévio sobre a forma da fronteira de referência nem sobre a importância relativa das variáveis, já que a técnica é totalmente não-paramétrica e evita vieses decorrentes de especificações arbitrárias (D'Inverno De Witte, 2020; Lavigne *et. al,* 2019; Karagiannis, 2017).

O uso do modelo DEA para a elaboração de índices compostos foi inicialmente proposta por Cherchye *et al*. (2007) e corresponde ao modelo CCR-DEA orientado ao *input*. Neste modelo, todas as variáveis se referem ao produto com apenas uma única entrada virtual igual a um para todas as observações.

Diferentemente do modelo DEA tradicional que avalia eficiência de uma determinada unidade de análise a partir da soma de produtos ponderados e insumos ponderados, no modelo DEA-BOD avalia-se o desempenho das unidades tomadoras de decisões por meio da agregação de um conjunto de indicadores que abordam aspectos relevantes em relação ao que está sendo avaliado. O índice composto obtido para cada DMU é uma combinação linear dos valores

observados dos indicadores simples com os pesos mais favoráveis para aquela unidade. E, assim, condensam-se em um único índice as informações contidas em um conjunto maior de indicadores (Ferreira *et. al*, 2023, Fusco, 2023). De modo que, o valor do índice composto resultante seja maximizado, sujeito a um limite superior igual a 1.

Mais precisamente, para determinar os pesos ótimos, o modelo DEA-BOD posiciona cada DMU de forma relativa, comparando-as entre si e buscando critérios de melhor desempenho (força relativa e fraqueza relativa). Isto é, o modelo DEA-BOD define o conjunto de pesos que maximize o impacto dos indicadores de força relativa e minimiza o impacto dos indicadores de fraqueza relativa no índice composto (Rogge; Jaeger; Lavigne, 2017).

Dessa forma, conceder o benefício da dúvida na definição dos pesos tem uma vantagem prática: as DMU com baixo desempenho (menos desenvolvidas) não poderão questionar seus resultados com o argumento de as suas condições naturais as colocam em posição de desvantagem, pois lhes é atribuída a melhor combinação de pesos possível. Assim, nenhum outro esquema de ponderação, diferente do especificado pelo modelo DEA-BOD, as colocaria em uma situação melhor. Isso pode ser visto como uma vantagem para identificar DMUs ineficientes, pois, se mesmo atribuindo os melhores conjuntos de pesos possíveis, a DMU não for eficiente, não restarão dúvidas sobre a sua ineficiência.

Neste sentido, uma das principais vantagens do modelo DEA-BOD é que ele permite que cada DMU selecione, com base em um processo de otimização, os pesos que enfatizem as suas potencialidades. Por essas características os pesos podem diferir de um município para outro.

Matematicamente, o modelo DEA-BOD, proposto por Cherchye *et al* (2007), pode ser descrito da seguinte maneira:

$$CI_{j0} = \max \sum_{r=1}^{s} y_{rj0} \; w_{rj0} \tag{13}$$

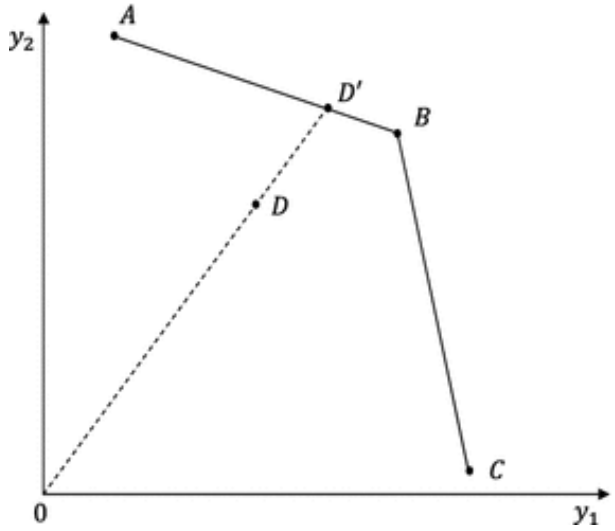
$$s.t. \sum_{r=1}^{s} y_{rj0} \; w_{rj0} \leq 1, \quad j = 1, \ldots, n$$

Sendo, CI_{j0} o índice composto para o município j_0; y_{rj0} representa os indicadores r=1,...,s s_0 do município j_0; w_{rj0} representam os pesos mais favoráveis dos indicadores analisados do município j_0; n é o número de DMUs e s representa o número de indicadores analisados.

A primeira restrição indica que cada município terá um índice composto igual ou inferior a um quando os pesos mais favoráveis lhes são aplicados. Portanto, o CIj_0 varia entre zero e um, e quanto mais próximo de um for o índice, melhores são os indicadores de sustentabilidade do município j_0 avaliado. Se CI$j_0 < 1$, isso significa que mesmo avaliando o município j_0 empregando-lhe o sistema de ponderação mais favorável possível, há pelo menos um outro município que apresenta indicadores de sustentabilidade melhores. Isso indica que ainda há espaço para melhorias nos indicadores de sustentabilidade, dado o nível global observado em toda a amostra. Se CI$_{j0}$=1, denota-se, então, que o município em análise não é superado por outro município em termos de sustentabilidade e é considerado como sua própria referência (representando o melhor desempenho, que é o *benchmark*) ao utilizar o sistema de peso mais favorável (D'Inverno De Witte, 2020).

Graficamente, o modelo DEA-BOD pode ser representado conforme a figura 4, onde a fronteira de produção é representada por uma linha continua que liga os pontos A, B e C.

Figura 4: Representação dos modelos DEA-BOD



Fonte: Mizobuchi (2014).

As DMUs localizadas sobre a fronteira (A, B e C) são classificadas como as de melhor desempenho, enquanto D, situada abaixo da fronteira, é classificada como a de pior desempenho. Portanto, quanto mais distantes da fronteira estiveram as DMUs, menor será o seu desempenho e, consequentemente, menor será a sua pontuação no índice. Assim, o desempenho de uma DMU é medido pela distância em que se encontra da fronteira.

Em síntese, os índices compostos baseados no modelo DEA-BOD possuem algumas características importantes: (1) os pesos variam de unidade para unidade; (2) são os mais vantajosos possíveis; (3) não há necessidade de informações prévias sobre os pesos e a importância de indicadores específicos; (4) o modelo é de fácil aplicação e interpretação; e (5) o índice obtido é sempre relativo às unidades analisadas, de modo que a unidade com melhor desempenho terá um índice igual a 1.

Além dessas vantagens, o modelo DEA-BOD não requer procedimentos de normalização das variáveis, o que evita a inclusão de mais subjetividade no processo de construção do índice, neste caso, é possível utilizar uma variedade de dados físicos e monetários, expressos em diferentes unidades de medida. Em análises de sustentabilidade, essa característica é importante, dada a natureza multifacetada do seu conceito, que envolve tanto indicadores econômicos, expressos em valores monetários, quanto dados sociais e ambientais, que utilizam outras unidades de medida (Mariano; Ferraz e Gobbo, 2021, Reig-Martínez; Gómez-Limón; Picazo-Tadeo, 2011).

Por outro lado, no modelo DEA-BOD, como ocorre nos modelos DEA tradicionais, pressupõe-se que todos os fatores analisados sejam desejáveis, o que implica que valores maiores indicam melhor desempenho. No entanto, o processo produtivo pode gerar tanto resultados desejáveis quanto indesejáveis. Um exemplo disso são as emissões de CO2, que são produtos do processo de produção; ou seja, a própria atividade produtiva gera algum nível de emissão. Nesse caso, o melhor que as DMUs podem fazer é limitar a produção do indicador indesejável.

Para lidar com fatores desejáveis e indesejáveis na medição de eficiência, Chung *et. al,* (1997) propuseram o uso da Função de Distância Direcional para simultaneamente expandir as saídas desejáveis e contrair as indesejáveis. Esse método, conhecido como abordagem direta para tratar fatores indesejáveis, oferece maior flexibilidade em relação aos modelos DEA tradicionais, pois permite mover tanto saídas desejadas quanto indesejadas (bem como as entradas) em direção à fronteira de eficiência. Sendo útil para lidar com o desempenho ambiental, onde a produção de fatores indesejáveis é frequentemente presente. Entre suas vantagens, destaca-se a capacidade de trabalhar com fatores desejáveis e indesejáveis na sua forma original, sem exigir alterações na escala de medição (Caiado *et al*., 2020).

Além dos métodos diretos, existem os métodos indiretos. Entre eles, destacam-se a Inversão Aditiva (ADD), Incorporação de Outputs Indesejáveis como Inputs (INP) e Inversão Multiplicativa (MLT). Esses métodos são chamados de indiretos porque o tratamento dado aos *outputs* indesejáveis ocorre antes das variáveis entrarem no modelo DEA, com os valores dos *outputs* indesejáveis sendo transformados em desejáveis para serem posteriormente incluídos no modelo.

No método da Inversão Aditiva (ADD), os valores dos *outputs* indesejáveis são multiplicados por (-1), transformando-os em *outputs* desejáveis. A desvantagem desse método é que ele pode gerar um excesso de pesos nulos devido aos valores negativos dos *outputs*.

O método de Incorporação de *Outputs* Indesejáveis como *Inputs* (INP) trata os *outputs* indesejáveis como *inputs.* A vantagem desse método é que, ao tratar os *outputs* indesejáveis como *inputs* em um modelo orientado aos *inputs,* esses *outputs* serão minimizados, o que é esperado. Se o modelo for orientado a *outputs,* esse valor será mantido. Neste caso, não é necessária nenhuma formulação matemática adicional para tratar as variáveis. No entanto, Seiford e Zhu (2002) argumentam que tratar *outputs* indesejáveis como *inputs* é assumir uma hipótese irrealista e não reflete o verdadeiro processo de produção. Além disso, Du, Lu e Yu (2014) argumentam que esse método implica que *outputs* indesejáveis podem ser reduzidos sem custo, o que não é verdade, limitando o uso desse método.

O método da Inversão Multiplicativa (MLT) inverte os valores dos *outputs* indesejáveis ($1/ui$). Em outras palavras, utiliza o inverso dos *outputs* indesejáveis como *outputs* desejáveis. Uma desvantagem desse método apontada por Dyson *et al*. (2001) é que esta transformação destruiria a escala de razão ou intervalo dos dados.

Outra forma de transformação, bastante utilizada em modelo DEA, é a transformação proposta por Seiford e Zhu (2002), que propuseram a soma dos inversos aditivos dos *outputs* indesejáveis com um valor positivo grande o suficiente (C) para que o resultado seja positivo ($-y_{und} + C$).

Neste estudo, aplicou-se o método direto, também utilizados por Zanella *et al.* (2015), Fusco (2015 e 2023), Rogge, Jaeger e Lavigne, (2017), Lavigne *et al.* (2019), e Mergoni, D'Inverno e Carosi (2022), que aplicaram o modelo de Função de Distância Direcional (DDF) para construir índices compostos na presença de indicadores desejáveis e indesejáveis sem a

necessidade de adotar procedimento de normalização como os já mencionados, que embora sejam comuns na literatura para tratar indicadores indesejáveis, eles sofrem algumas críticas devido às suas limitações conceituais e metodológicas, pois o resultado do índice é influenciado pelo modelo de normalização adotado pelo pesquisador.

A seguir, apresenta-se a adaptação do modelo DDF de Chambers *et al*. (1996) por Chung *et al*. (1997) para trabalhar com fatores indesejáveis, e também o modelo de indicador composto derivado das DDF, utilizado nessa tese para calcular o índice de sustentabilidade rural.

3.4.4 Modelo *Benefit-of-the-Doubt* adaptado a Função de Distância Direcional incluindo fatores indesejáveis e restrições de pesos (DEA-BOD de distância direcional)

Chambers *et al*. (1996) desenvolveram uma DDF que permite expandir simultaneamente *outputs* e contrair os *inputs* ao longo de um caminho definido pelo vetor direcional *g,* como o objetivo de alcançar a fronteira de eficiência. Posteriormente, Chung *et al*. (1997) ampliaram esse modelo para permitir a inclusão de fatores indesejáveis na avaliação do desempenho, possibilitando simultaneamente a expansão de *outputs* desejáveis e a contração de *inputs* e *outputs* indesejáveis.

O modelo de retornos constantes de escala de Chung *et al.* (1997) é apresentado na equação (14).

$$\vec{D}(x, y, b; g) = \max \delta \tag{14}$$

$$s.t. \sum_{j=1}^{n} yrj\ \lambda_j \geq yrj_0 + \ \delta g_{yrj_0} \qquad r = 1, ..., s$$

$$\sum_{j=1}^{n} b_{kj}\ \lambda_j = \ b_{kj_0} - \ \delta g_{bkj_0} \qquad k = 1, ..., l$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\ \lambda_j \ \leq \ x_{rj_0} - \delta g_{xij_0} \qquad i = 1, ..., m$$

$$\lambda_j \geq 0 \qquad j = 1, ..., n$$

Em (14) x_{ij} (i = 1, ..., m) representam os *inputs* utilizados pela DMU j (j = 1, ..., n) para produzir yrj (r = 1, ..., s) *outputs* desejáveis e b_{kj} (k = 1, ..., l) *outputs* indesejáveis. O λ_j representa as variáveis de intensidade, e indicam os *peers* da DMU avaliada j_0. A magnitude de λ_j representa a intensidade com que o *benchmark j* foi utilizado no conjunto de referência da DMU j_0. Os componentes do vetor $g = (g_y, -g_b, -g_x)$ indicam a direção de mudança para os *inputs* e *outputs*. Valores positivos dos componentes indicam expansão dos *outputs* desejáveis,

enquanto valores negativos indicam a contração dos *outputs* indesejáveis e dos *inputs.* O fator δ indica a extensão das ineficiências das DMUs e corresponde à expansão máxima possível dos *outputs* desejáveis e à contração simultânea de *outputs* indesejáveis e *inputs.*

O modelo de Chung *et al.* (1997) assume fraca descartabilidade (*weak disposability*) dos *outputs* indesejáveis, o que significa que esses *outputs* não podem ser reduzidos sem custo, pois são subprodutos dos *outputs* desejáveis. Ou seja, para produzir uma unidade de *output* desejável, gera-se alguma quantidade de resíduos ou poluição (*output* indesejável). Deste modo, a redução dos *outputs* indesejáveis implica, necessariamente, na redução da produção de *outputs* desejáveis ou no aumento de *input*.

Zanella *et al.* (2015) adaptaram o modelo direcional de Chung *et al.* (1997) para o contexto de indicadores compostos, propondo duas modificações centrais para adequar a metodologia. A primeira modificação teve como objetivo redesenhar a fronteira eficiente para eliminar segmentos com inclinação descendente na fronteira eficiente. A existência desses segmentos levaria a uma classificação de eficiência contraintuitiva, onde algumas DMUs poderiam ser classificadas como eficientes, embora sejam claramente superadas por outras DMUs que apresentam melhor desempenho em todos os indicadores. Para isso, substituiu-se a restrição de igualdade relacionada aos produtos indesejáveis (equação 14) por uma restrição de desigualdade (modelo 15).

A segunda modificação está relacionada às restrições dos *inputs*. O modelo de Zanella *et al*. (2015) considera um *input* unitário para todas as DMUs, de modo que a restrição originalmente associada aos *inputs* se reduz à condição $\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \leq 1$. Os autores propuseram uma alteração nessa restrição para que ela seja escrita com uma igualdade, ou seja, $\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$. Essa modificação tem como objetivo obter uma fronteira apropriada para avaliações que envolvem a agregação de medidas expressas como razões, como é o caso dos indicadores compostos, permitindo obter uma fronteira com propriedades equivalentes à do modelo tradicional de DEA-BOD.

Dessa forma, o modelo direcional de Zanella *et al.* (2015) se diferencia do modelo BOD tradicional essencialmente na maneira como as DMUs são projetadas para a fronteira, utilizando um vetor direcional para indicar o caminho de melhoria. Nessa nova formulação, uma DMU será classificada como eficiente apenas quando não forem possíveis melhorias simultâneas tanto nos produtos desejáveis quanto nos indesejáveis.

$$\max \delta \tag{15}$$

$s.t\ \sum_{j=1}^{n} b_{kj}\,\lambda_j \leq\ b_{kj0} - \delta g_b \qquad k = 1,\ldots, l$

$\sum_{j=1}^{n} y_{rj}\,\lambda_j \geq y_{rj0} + \delta g_y \qquad r = 1,\ldots, s$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$$

$\lambda_j \geq 0 \qquad j = 1,\ldots, n$

O vetor de direção $g = (g_y, g_b)$ pode assumir várias configurações. Seus componentes (g_y, g_b) indicam a direção das melhorias para os *outputs* desejáveis e indesejáveis, refletindo diferentes objetivos gerenciais (Zanella; Camanho; Dias, 2015). Nessa tese, o vetor direcional é definido como g = (b_{kj_0}, y_{rj_0}), ou seja, o vetor é formado pelos valores dos *outputs* da DMU em avaliação, deixando que os próprios municípios busquem melhorias proporcionais nos indicadores para alcançarem a fronteira de eficiência. Neste caso, as saídas desejáveis e indesejáveis são expandidas e contraídas, de acordo com uma direção que corresponde a mudanças proporcionais aos níveis originais das variáveis.

Ao definir essa direção, cada município segue sua própria trajetória de melhorias, o que garante um alto nível de flexibilidade e uma interpretação proporcional das melhorias, além de preservar a invariância das unidades do modelo de distância direcional (D'Inverno; De Witte, 2020). O resultado do modelo (δ) fornece uma medida do quanto cada DMU poderia melhorar proporcionalmente os seus indicadores (aumentar os desejáveis e reduzir os indesejáveis) para passar a operar na fronteira de desempenho. Nesses casos, o resultado do Indicador Composto pode ser obtido fazendo $\mathrm{IC}_{j_0} = 1/(1+\delta)$.

A formulação multiplicadora do modelo direcional proposta por Zanella *et al.* (2015) é apresentada na equação (16).

$$min\ -\ \sum_{r=1}^{s} y_{rj0}\,u_r\ +\ \sum_{k=1}^{l} b_{kj0}\,k\ +\ v \tag{16}$$

$$s.t. \sum_{r=1}^{s} g_y\,u_r\ +\ \sum_{k=1}^{l} g_b\,p_k\ =\ 1$$

$$-\sum_{r=1}^{s} y_{rj}\, u_r \;+\; \sum_{k=1}^{l} b_{kj}\, p_k \;+\; v \;\geq\; 0, \qquad\qquad j \;=\; 1,\ldots,n$$

$$v \in R$$

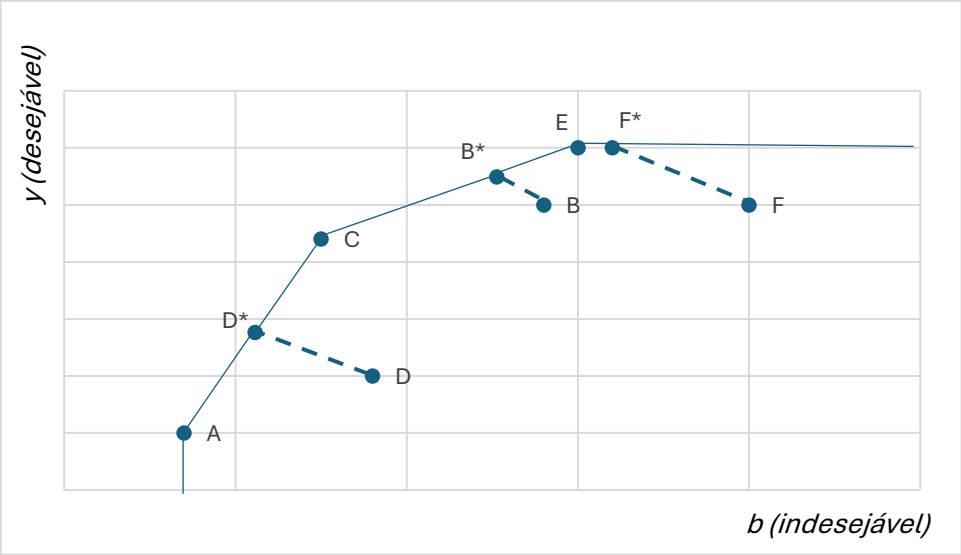
$$u_r \geq 0, \qquad\qquad r = 1,\ldots,s$$

$$p_k \geq 0 \qquad\qquad k = 1,\ldots,l.$$

Sendo, y_{rj0} e b_{kj0} os indicadores observados *r* desejável e *k* indesejável do município avaliado j_0. u_r e p_k são os pesos mais favoráveis para o indicador *r* desejável e *k* indesejável para o município avaliado j_0. *n* é o número de municípios analisados.

O gráfico 1 ilustra a fronteira de melhores práticas do modelo DEA-BOD de distância direcional com fator desejável e indesejável. Os pontos A, C e E representam as DMUs eficientes e os pontos B, D e F as DMUs ineficientes, a linha tracejada representa a direção que a DMU deve percorrer para alcançar a fronteira, de modo que os *outputs* desejáveis e indesejáveis são, respectivamente, expandidos e contraídos.

Gráfico 1: Modelo DEA-BOD de distância direcional com fator desejável e indesejável



Fonte: Adaptado do estudo de Zanella *et al.* (2015).

Esse modelo combina as vantagens do modelo DEA-BOD com a Função de Distância Direcional que acomoda também *outputs* indesejáveis, conforme introduzido por Chung *et al.* (1997). A vantagem da formulação direcional do modelo DEA-BOD de Zanella *et al*. (2015) em comparação à formulação tradicional proposta por Cherchye *et al.* (2007), é permitir ajustes

simultâneos de fatores desejáveis e indesejáveis, sem a necessidade de ajustes prévios nas escalas de medida. Neste caso, a solução ótima da equação (16) corresponde à melhoria máxima factível nos produtos desejáveis e indesejáveis que pode ser alcançada simultaneamente.

Neste estudo, a sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano foi avaliada em um primeiro momento permitindo total flexibilidade na definição dos pesos (modelo sem restrição de pesos), isso para conceder aos municípios o benefício da dúvida na avaliação do seu desempenho sustentável. Neste caso, a DMU é avaliada com os pesos que valorizem as suas características de melhor desempenho, a vantagem do modelo sem restrição é que ele permite identificar DMUs que são de fato ineficientes.

Em um segundo momento, adotou-se o modelo com restrição de pesos para que nenhum indicador tenha peso nulo e seja ignorado na avaliação de desempenho. As restrições aos pesos dos indicadores possibilitam enfatizar a importância relativa de todos os indicadores em relação aos componentes avaliados (social, econômico e ambiental) e também melhoram o poder de discriminação entre os municípios avaliadas.

No modelo com restrição de pesos, adotou-se a formulação aprimorada de restrições de pesos ARI de Zanella *et al.* (2015) apresentada na equação (17). Essa restrição expressa a importância relativa dos indicadores de saída em termos percentuais e é imposta sobre a "DMU média", que representa os valores médios de desempenho nos critérios desejáveis e indesejáveis. Isto garante que todas as DMUs sejam avaliadas em relação a uma fronteira única de melhores práticas, ao invés de diferentes fronteiras como no modelo de restrições de peso virtual aplicado a DMU j_0 em avaliação, conforme inicialmente proposto por Wong e Beasley (1990). O índice composto quando é estimado com base em restrições aplicadas sobre a DMU j_0 geram diferentes fronteiras, uma para cada DMU avaliada, neste caso, algumas DMUs consideradas ineficientes quando avaliadas em relação a sua própria fronteira podem aparecer com *benchmarking* para outras DMUs.

As restrições de pesos são importantes para evitar que a maioria dos indicadores receba peso zero na avaliação de desempenho, fazendo com que a DMU seja considerada eficiente de forma indevida. Sem essas restrições, o modelo tem total liberdade na definição dos pesos e, como resultado, um número muito elevado de unidades avaliadas poderiam atingir o valor máximo do indicador composto. Isso ocorre porque o modelo sempre busca a combinação de pesos mais favorável, eliminando a influência de fatores com baixo desempenho, a fim de

maximizar o resultado das DMUs (Maricic; Jeremic, 2023). Deste modo, diferentes restrições de peso têm sido adicionadas aos modelos para garantir que os indicadores tenham uma contribuição mínima na avaliação ou então para refletir opiniões de especialistas sobre a importância relativa dos indicadores, tal como discutido em Wong e Beasley (1990), Thanassoulis *et al.* (2004) e Zanella *et al.* (2015).

$$\frac{u_r\,\overline{y_r}}{\sum_{r=1}^{s} u_r\,\overline{y_r} + \sum_{k=1}^{l} p_k\,\overline{b_k}} \geq w \text{ para a saída desejável,} \qquad (17)$$

$$\frac{p_k\,\overline{b_k}}{\sum_{r=1}^{s} u_r\,\overline{y_r} + \sum_{k=1}^{l} p_k\,\overline{b_k}} \geq w \text{ para a saída indesejável.}$$

Neste estudo, para calcular o índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano, aplicou-se a Função de Distância Direcional (DDF) especificada dentro de um modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA), técnica implantada por Zanella *et al*. (2015), e adotada por Fusco (2015 e 2023), Rogge, Jaeger e Lavigne (2017), Lavigne *et al.* (2019) e D'Inverno e De Witte (2020).

O modelo DEA-BOD de distância direcional foi executado usando o *software Aimms*.

3.5 Correlação de Spearman e Kendall

Por fim, para verificar se existe correlação na posição do *ranking* dos indicadores medidos pela PCA e DEA-BOD de distância direcional realizou-se os testes de correlação de Spearman e Kendall.

O coeficiente de Spearman é uma estatística muito utilizada para medir a correlação entre duas variáveis e avaliar a dependência numérica de valores contínuos e discretos, incluindo valores ordinais. Como outros coeficientes de correlação (por exemplo, de Pearson), o coeficiente de postos de Spearman varia de -1 a +1. Quanto mais próximo de +1 ou -1 mais forte é a correlação entre as variáveis. Se a correlação de Spearman for zero, isso indica ausência de associação entre as ordens (Shaker; Sirodoev, 2016).

É importante destacar que o coeficiente de Spearman é um coeficiente de correlação de postos, deste modo, deve ser convertido em postos antes de serem realizados os cálculos do coeficiente de correlação. O coeficiente de correlação de Spearman pode ser calculado conforme equação:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_i di^2}{n\,(n^2-1)} \quad (18)$$

Em que, ρ é o coeficiente de correlação, di^2 é a diferença entre cada par de postos correspondentes dos valores de x_i e y_i, ou seja, representa as posições de x_1 em relação aos valores de *x* menos as posições de y_1 em relação aos valores de *y*, se x_i e y_i estiverem na mesma posição di será zero e ρ será 1. E *n* é o número de pares de (x_1, y_1), onde *i* = 1,...,*n.*

Já o coeficiente de Kendall mede o grau de correspondência entre dois *rankings* (e a significância estatística dessa associação). E pode ser calculado da seguinte forma:

$$\tau = \frac{4P}{n(n-1)} - 1 \quad (19)$$

Em que, *P* é a soma dos "pares concordantes" nos dois *rankings*. A correlação de Kendall entre duas variáveis será alta quando as observações tiverem classificações semelhantes entre as duas variáveis, e será baixa quando as observações tiverem classificações muito diferentes.

Embora sejam parecidos os coeficientes de correlação de Spearman e Kendall possuem interpretações diferentes. O coeficiente de Spearman é similar ao coeficiente de Pearson em proporção a variância explicada, enquanto Kendall representa uma probabilidade, expressa a probabilidade de os dados observados estarem na mesma ordem e de não estarem na mesma ordem.

A correlação de Spearman e Kendall foi calculado utilizando o *software R-studio.*

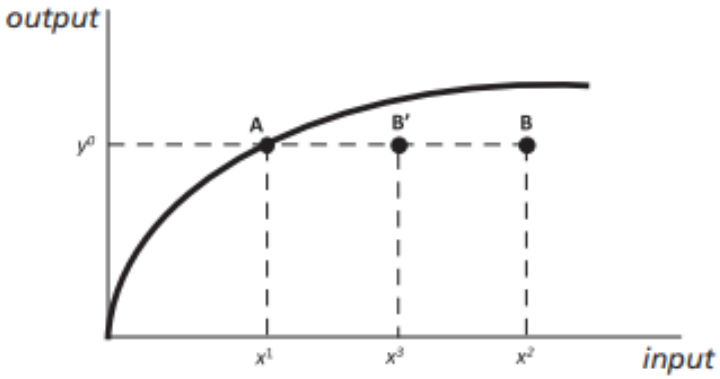
3.6 Análise da influência de fatores exógenos no índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano

Por último, estimados os índices de sustentabilidade por meio dos modelos PCA e DEA-BOD de distância direcional no primeiro estágio, no segundo buscou-se identificar o efeito de fatores exógenos no índice calculado, com o objetivo de identificar alternativas que permitam às unidades avaliadas alcançarem o máximo desempenho esperado. Para isso, utilizou-se o modelo de regressão Tobit, apontando por alguns autores (Santos; Rover, 2019, Feng *et al.,* 2017), como sendo o mais adequado para a análise de dados com característica censurada, como o índice composto de sustentabilidade, cujas variáveis são limitadas a um intervalo específico de valores.

A escolha pelo modelo Tobit justifica-se pela natureza censurada da variável dependente, já que os índices de sustentabilidade (IDS-PCA e DEA-BOD com restrição de pesos) assumem valores no intervalo de 0 a 1. Nesse contexto, a regressão linear tradicional poderia gerar estimativas viesadas, sendo o modelo Tobit mais adequado para esse tipo de estudo.

A figura 5 ilustra como uma variável exógena, fora do controle dos gestores, pode influenciar no desempenho de uma DMU. Sobre a fronteira de produção está a DMU A, indicando que é tecnicamente eficiente, pois utiliza a quantidade mínima de insumos (x_1) para produzir (y_0) de produto. Por outro lado, a DMU B utiliza uma quantidade maior de insumos (x_2) para obter o mesmo nível de produção (y_0), sendo, portanto, tecnicamente ineficiente.

Figura 5: Influência de variáveis exógenas



Fonte: Fernandes e Filho, 2018.

Entretanto, a ineficiência da DMU B pode não decorrer apenas da má utilização do insumo, mas também de fatores exógenos desfavoráveis. Se esses fatores forem eliminados, a DMU B poderia passar a utilizar a quantidade de insumos x_3, no ponto B', que é menor que x_2, para produzir a mesma quantidade de produtos (y_0). Nesse caso, estaria mais próxima da fronteira de produção, diminuindo sua ineficiência técnica.

A dificuldade dos modelos tradicionais em captar o efeito de variáveis exógenas sobre a eficiência das DMUs leva, muitas vezes, à rejeição, por parte dos gestores, das sugestões de melhorias indicadas pelo modelo DEA por não considerarem tais efeitos. Para corrigir essa fragilidade, foi empregada a técnica de regressão Tobit, desenvolvido por James Tobin em 1958. Esse modelo descreve a relação entre uma variável dependente não negativa *yi* e uma variável independente *xi.* De modo que a variável dependente é o índice de sustentabilidade rural

calculado, e as variáveis exógenas são as variáveis independentes do modelo. Este modelo possuiu a seguinte formulação (20) e (21):

$$y_i^* = Xi\beta + \mu i \qquad (20)$$

$$\gamma i = \begin{cases} y_i^*, \text{ se } y_i^* \leq 0 \\ 0, \text{ se } y_i^* > 0 \end{cases} \qquad (21)$$

Em que, γi é uma variável não observável "latente", *Xi* é um vetor de variáveis explicativas, β é um vetor de parâmetros desconhecidos e μi é o erro.

No modelo de regressão Tobit, a variável dependente pode ser censurada à esquerda, à direita ou em ambos os lados, e o limite inferior ou superior pode assumir qualquer valor numérico, como demostrado em (22) e (23):

$$\gamma i = Xi\beta + \mu i \qquad (22)$$

$$\gamma i = \begin{cases} a, \text{ se } \gamma i \leq a \\ \gamma i, \text{ se a} < \gamma i < b \\ b, \text{ se } \gamma i \geq b \end{cases} \qquad (23)$$

Sendo *a* o limite inferior e *b* o limite superior da variável dependente. Se $a = -\infty$ ou $b = \infty$, a variável dependente não é censurada à esquerda nem à direita, respectivamente.

De posse dos índices de sustentabilidade calculados para cada município e das variáveis exógenas que podem explicá-los, definiu-se o modelo de regressão:

$$IDS = \beta 0 + \beta 1 \ln(prop_{acesso_{recursos_{crédito}}}) + \beta 2 \ln(credito_{total}) + \beta 3 \ln(orientação_{técnica}) + + \beta 4 \ln(área_{lavoura\ e\ pastagem}) + \beta 5 \ln(area_{média}) + \beta 6 \ln(prop_{irrigação}) + \beta 7 \ln(razão_{jovens}) + ui \qquad (24)$$

Em que, IDS é o índice de sustentabilidade do i-ésimo município; β representa os parâmetros a serem estimados e *ui* é o termo de erro que se presume ter média 0 e variância constante.

Para a análise de regressão Tobit, foram selecionadas sete variáveis de controle, descritas no quadro 3. Essas variáveis não foram utilizadas na construção do índice composto,

mas influenciam, de alguma forma, a pressão ambiental sobre a região. Por isso, foram escolhidas com o objetivo de capturar o efeito que esses fatores exógenos exercem sobre o índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano. Todas as variáveis foram transformadas em logaritmo.

Quadro 3: Descrição das variáveis exógenas

Variáveis	Descrição	Fonte	Fundamentação teórica
Prop_acesso_recursos_crédito	Proporção de agencias	IPEADATA	Mejía Tejada *et al* (2024)
Crédito_total	Proporção de crédito rural total por número de estabelecimentos rurais	Bacen	Oliveira, Alves e Sousa (2024); Silva, Justo e Cavalcante (2022)
Orientação_técnica	Proporção de acesso a orientação técnica por estabelecimentos rurais	Censo Agropecuário 2017	Oliveira, Alves e Sousa (2024); Silva, Justo e Cavalcante (2022)
Área_lavoura_pastagem	Área de uso de lavoura + área de uso de pastagem	Censo Agropecuário 2017	Mejía Tejada *et al* (2021)
Área média	Área total dividida pelo total de estabelecimentos	Censo Agropecuário 2017	Ramos *et al* (2024)
Irrigação	Proporção de estabelecimentos rurais com acesso a irrigação	Censo Agropecuário 2017	Oliveira, Alves e Sousa (2024); Silva, Justo e Cavalcante (2022); Lazaretti *et al* (2019)
Razão Jovens	Razão entre os menores de 25 anos e os maiores de 55 anos.	Censo Agropecuário 2017	Souza (2019)

Fonte: Elaboração própria.

Neste contexto, as variáveis proporção de acesso a recursos de crédito e o total de crédito rural por estabelecimentos representam a disponibilidade e o acesso dos produtores a recursos financeiros, tão importante para conectar os produtores a novas tecnologias, máquinas e equipamentos necessários para à produção, além de auxiliar na cobertura de custos operacionais

e de comercialização e a financiar a implementação de recursos tecnológicos, essenciais para a expansão da produção e o aumento da produtividade.

Nesse contexto, a política de crédito rural configura-se como uma ferramenta essencial para apoiar os produtores rurais na adoção de práticas sustentáveis de produção, assegurando a geração de renda, ao mesmo tempo em que promove a preservação do meio ambiente e dos recursos naturais.

A assistência técnica foi incluída na análise porque, de acordo com os estudos anteriores, ela contribui para uma maior eficiência do sistema de produção e do uso dos recursos, à medida que amplia o conhecimento técnico dos produtores. A variável irrigação foi incorporada com o objetivo de verificar a relação dessa prática com o índice de sustentabilidade rural. Segundo Silva, Justo e Cavalcante (2022), a irrigação pode favorecer a eficiência no uso da terra, permitindo maior produção em uma área menor. Além disso, funciona como uma alternativa para combater os efeitos adversos do clima e para estabilizar a produção.

Além dessas, foram incluídas no modelo as variáveis área média e área de lavoura e pastagens para identificar o efeito do tamanho das propriedades e da proporção de áreas de cultivo no índice de sustentabilidade. A razão jovem para identificar se a idade influência no índice de sustentabilidade, ou seja, se ter mais jovens tem efeito positivo no índice.

O modelo Tobit foi estimado utilizando o pacote CensReg do *software R.*

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo os métodos descritos na seção anterior, mensurou-se o índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano. Os resultados são apresentados na seção 4.2.

4.1 Análise descritiva das variáveis

Como explicado nas seções anteriores o índice composto desenvolvido neste estudo se baseia em um conjunto de indicadores que representam aspectos multidimensionais da sustentabilidade rural englobando características desejáveis e indesejáveis.

Para facilitar as comparações diretas entre os municípios, independentemente do seu tamanho, todas as variáveis utilizadas nos modelos foram transformadas em indicadores, refletindo razões ou proporções.

A tabela 1 apresenta a estatística descritivas dos indicadores utilizados na avaliação da sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano. Observa-se grande heterogeneidade entre os municípios. Os desvios padrão das variáveis mostram essa diferença entre os municípios, o valor da produção por pessoa ocupada, por exemplo, difere expressivamente entre eles (22,52), indicando que inter-região existem municípios com grande percentual de produção por pessoa ocupada e municípios com pequeno percentual de produção por pessoa ocupada. Já o valor da produção por área e o valor da produção por CO_2 apresentam médias mais modestas, mas com variação considerável, refletindo diferenças na eficiência produtiva e ambiental. A variável comercialização também se destaca pela ampla amplitude (0,01 a 1,00), indicando distintos níveis de inserção no mercado.

Tabela 1: Estatística descritiva das variáveis

Variável	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Quantil 1	Quantil 3
Alfabetizados	0,69	0,09	0,36	0,94	0,62	0,74
Médicos_habitantes	1,48	0,77	0,40	5,02	0,98	1,77
Pessoal_ocupado	2,68	0,54	1,50	5,78	2,34	2,87
Práticas_sustentáveis	0,64	0,27	0,01	1,32	0,44	0,81
Área_lavoura	0,12	0,13	0,00	0,75	0,04	0,15
Mata e sistemas	0,32	0,19	0,01	0,94	0,18	0,44
Recursos_hídricos	1,43	0,23	1,05	2,22	1,26	1,58
Área_lâmina_agua	0,05	0,04	0,00	0,30	0,02	0,06

Valor_prod_pessoa_ocupada	8,12	22,52	0,80	260,29	2,44	6,16
Valor_produção_área	0,50	0,48	0,06	5,07	0,23	0,62
Valor_produção_CO2	0,02	0,02	0,00	0,18	0,01	0,02
Comercialização	0,50	0,33	0,01	1,00	0,20	0,83
Emissões_área	33,51	15,54	5,08	92,97	23,02	41,65
Desmatamento	0,27	0,18	0,02	1,20	0,15	0,38
Pastagens_degradadas	0,60	0,27	0,02	1,00	0,38	0,84
Áreas_antropicas	1,15	0,73	0,11	10,41	0,81	1,32
Proporção_animais	0,39	0,18	0,06	1,23	0,26	0,47

Fonte: Resultados da pesquisa, 2025.

Quanto aos indicadores sociais, a proporção de alfabetizados apresenta média elevada (0,69) e baixa dispersão (desvio padrão de 0,09), indicando relativa homogeneidade entre as unidades. Em contraste, o indicador de médicos por habitante exibe maior variabilidade, com média de 1,48 e valores que variam de 0,40 a 5,02, sugerindo fortes desigualdades no acesso a serviços de saúde. O pessoal ocupado também apresenta média relativamente alta (2,68), mas com dispersão moderada, refletindo diferenças estruturais no mercado de trabalho local.

Entre as variáveis relacionadas às práticas produtivas e ambientais, destaca-se a elevada dispersão em práticas sustentáveis, cuja média é de 0,64, mas com mínimo próximo de zero (0,01) e máximo de 1,32, evidenciando diferentes níveis de adoção dessas práticas. A área de lavoura e a área de lâmina d'água apresentam médias reduzidas (0,12 e 0,05, respectivamente), porém com coeficientes de variação elevados, indicando forte assimetria e concentração em poucas unidades. Por sua vez, a variável mata e sistemas apresenta média de 0,32, com amplitude considerável (0,01 a 0,94), sinalizando contrastes relevantes na preservação ambiental.

No grupo de indicadores de recursos naturais, os recursos hídricos se destacam por apresentarem média relativamente elevada (1,43) e menor dispersão, sugerindo maior uniformidade na disponibilidade hídrica. Em contrapartida, as emissões por área exibem valores expressivos, com média de 33,51 e máximo de 92,97, refletindo elevados níveis de pressão ambiental em determinadas localidades. O desmatamento e as pastagens degradadas também apresentam médias relevantes (0,27 e 0,60, respectivamente), com ampla variação, indicando diferentes estágios de degradação ambiental. Por fim, as áreas antrópicas apresentam média de 1,15, mas com valor máximo de 10,41, reforçando a heterogeneidade no uso e ocupação do solo. A proporção de animais, embora apresente média intermediária (0,39), também revela dispersão relevante, sugerindo distintos perfis produtivos entre as unidades analisadas.

4.2 Índices de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano

4.2.1 Indicador construído a partir da Análise de Componentes Principais (PCA)

Nesta seção são apresentadas as estimativas do índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano mensurado pelo método de Análise de Componentes Principais. O índice de sustentabilidade foi calculado no nível de município, agregando os indicadores descritos no quadro 1, conforme equações apresentadas na seção 3.4.1.

Antes de dar prosseguimento na PCA, foi verificada a adequabilidade dos dados ao referido método de análise. Para isso, realizou-se os testes KMO e esfericidade de Bartlett. O teste KMO teve como resultado 0,67, valor aceitável seguindo os parâmetros de Hair (2009). O teste de esfericidade de Bartlett foi significativo ao nível de significância de 1%, portanto, rejeita-se a hipótese nula de que a matriz de correlação não é uma matriz identidade, indicando que o conjunto de dados utilizado no estudo é apropriado para a análise PCA.

O teste KMO foi realizado com os 17 indicadores. Na análise individual das variáveis identificou-se que as variáveis proporção de desmatamento por hectare, proporção de área de lâmina d'água e a proporção de pastagens degradadas apresentavam resultados inferiores a 0,5 indicando baixa adequação à análise e, por isso, foram retiradas da análise, restando 14 variáveis na solução final, como demostrado na tabela 3. No modelo PCA as variáveis indesejáveis foram inseridas com seus valores inversos ($1/u_i$), sendo transformadas em fatores desejáveis, desta forma quanto menores os valores melhores eram os resultados.

Deste modo, verificada a adequabilidade dos dados ao modelo PCA, prosseguiu com a extração dos componentes principais, seguindo os seguintes critérios: autovalor associado à variável maior ou igual a 1 e variância cumulativa das variáveis maior ou igual a 60%. Seguindo esses critérios, reteve-se os 5 primeiros componentes que juntos explicam 69,88% da variabilidade do conjunto de dados (tabela 2).

Tabela 2: Valores das raízes características e percentual de variância total explicada

Componentes	Raiz característica	Variância explicada pelo fator (%)	Variância acumulada (%)
1	3,69	26,38	26,38
2	2,46	17,57	43,96
3	1,37	9,80	53,76
4	1,16	8,28	62,05
5	1,09	7,83	69,88

Fonte: Resultados da pesquisa, 2025.

Para a extração dos componentes, realizou-se a rotação ortogonal dos componentes pelo método *Varimax* que tem a vantagem de gerar uma estrutura mais simples de interpretar, com uma melhor discriminação entre os componentes. Na tabela 3, são apresentadas as cargas dos componentes, que demonstram as correlações entre as variáveis originais e os componentes rotacionados. Foram destacados em negrito os valores absolutos maiores que 0,60, que indicam que a respectiva variável está fortemente associada ao componente. Assim, quanto maior a carga do componente, maior é a correlação da variável com o fator correspondente.

Na tabela 3 é possível identificar as características de cada um dos componentes. O primeiro componente carrega o maior número de variáveis e são elas: valor da produção por CO2 (0.893), valor da produção por pessoa ocupada (0.820), proporção de pessoas ocupadas na atividade agrícola (0.772) e valor da produção por área (0.755). Todas apresentam sinal positivo, indicando efeito positivo sobre o componente 1, ou seja, maiores valores para essas variáveis elevam o escore desse fator. Por representarem a dimensão econômica da sustentabilidade, esse fator foi denominado "Componente Econômico", e explica 26,38% da variância total dos dados.

O segundo componente explica 17,57% da variância total e apresenta maiores cargas nas variáveis emissões de CO2 por área (0.904), proporção de animais por hectare (0.760), proporção de áreas antrópicas (0.736) e mata e sistemas agroflorestais (0.635). Todas possuem sinal positivo, indicando efeito positivo sobre o componente 2. As variáveis emissões de CO2 por área, proporção de animais por hectare, proporção de áreas antrópicas são fatores indesejáveis e foram inseridas no modelo PCA com seus valores inversos, ou seja, quanto menor melhor, portanto, neste caso, municípios com menor proporção de emissões por área, menor proporção de animais por hectare e menor proporção de áreas antrópicas tem um *score* maior nesse componente. Por se referirem a dimensão ambiental, o componente foi denominado "Componente Ambiental". A maioria das variáveis são carregadas no primeiro e segundo componente, sendo eles os principais determinantes da sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano.

O terceiro fator, responsável por 9,80% da variância total, apresenta maiores cargas nas variáveis proporção de área de lavoura em relação a área total (0.686) e proporção de área de recursos hídricos em relação ao total de estabelecimentos (-0.887), sendo esta última negativa.

Indicado impacto negativo dessa variável no fator 3, denominado “Componente Agrícola”. Esse resultado negativo pode ser explicado como um indicativo de que, para tipo de sustentabilidade avaliada neste estudo, a presença de estabelecimentos rurais com acesso a nascentes e rios protegidos ou não por matas, poços e cisternas é pequena na região do semiárido. Ou seja, áreas com maior intensidade agrícola tendem a apresentar menor proporção relativa de recursos hídricos.

O quarto fator explica 8,28% da variância total e apresenta maiores cargas nas variáveis proporção de comercialização da produção (0.817), isto é, a proporção do que é produzido e efetivamente vendido, e à proporção de produtores alfabetizados (0.774), denominado “Componente socioeconômico”. Ambas com sinal positivo indicando efeito positivo das variáveis sobre o fator 4.

Por fim, o quinto fator explica 7,83% da variância total, apresenta maiores cargas nas variáveis proporção de estabelecimentos rurais que adotam algum tipo de prática sustentável (0.726) e proporção de médicos por habitantes (0.700), é denominado “Componente Socioambiental”. Ambas com sinal positivo indicando efeito positivo das variáveis sobre o fator 5.

Em síntese, os municípios com índices mais elevados de sustentabilidade são aqueles que apresentam valores mais altos nas variáveis que têm maiores cargas nos fatores extraídos.

Tabela 3: Cargas fatoriais após a rotação ortogonal dos fatores

Variáveis	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4	Componente 5	Comunalidades
Porp_alfabetizados	0.045	-0.050	0.004	**0.774**	0.163	0.630
Médicos_habitantes	0.122	-0.187	0.035	0.130	**0.700**	0.559
Prop_p_ocupada	**0.772**	0.180	-0.147	-0.164	-0.027	0.678
Prop_sustentáveis	-0.088	0.220	-0.023	-0.131	**0.726**	0.602
Prop_lavoura	0.417	-0.024	**0.686**	0.214	0.073	0.698
Mata_sistema	-0,031	**0.635**	-0.244	-0.121	0.123	0.493
Prop_recursos_hidrícos	0.008	0.019	**-0.887**	0.122	0.027	0.803
Valor_prod_pessoa_ocupada	**0.820**	0.145	0.043	-0.042	0.059	0.702
Valor_produção_área	**0.755**	-0.285	0.268	0.174	0.003	0.754
Valor_produção_co2	**0.893**	0.196	0.259	0.150	0.007	0.926
Prop_comercialização	-0.020	0.003	0.008	**0.817**	-0.166	0.696

Emissões_área	0,165	**0.904**	0.085	0.083	-0,081	0.866
Prop_antropic	-0.020	**0.736**	-0.033	-0.084	-0.029	0.551
Prop_animais	0,439	**0.760**	0.187	0.104	0.039	0.818

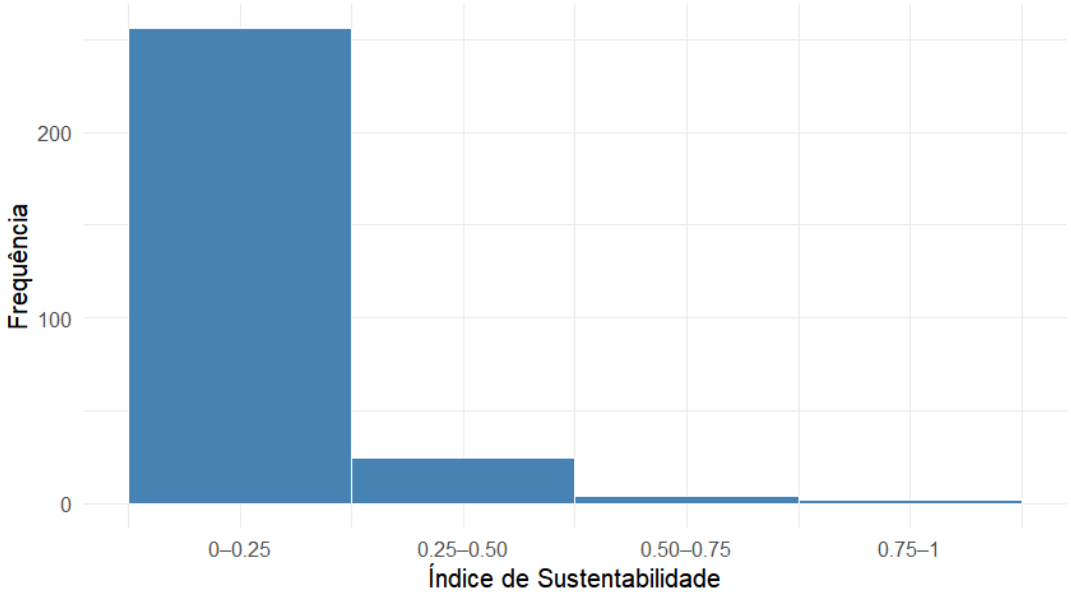
Fonte: Resultados da pesquisa, 2025.

Analisadas as cargas de cada componentes, extraiu-se os escores para calcular o índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano, conforme a fórmula (3). O índice médio de sustentabilidade rural foi de 0,15, com desvio padrão 0,12. Em geral, observou-se um baixo nível de sustentabilidade rural na região do semiárido baiano como um todo (mapa 1). Esses resultados corroboram com o estudo de Ferreira, Branchi e Oliveira (2024) que calcularam o índice de Desenvolvimento Rural Sustentável das microrregiões brasileiras e identificaram índices muito baixos de desenvolvimento rural sustentável nas microrregiões.

Os municípios com os maiores índices estão localizados na mesorregião Extremo Oeste Baiano, sendo eles: Formosa do Rio Preto (1,00) São Desidério (0,89) e Barreiras (0,64), ocupando o primeiro, segundo e quarto lugar no *ranking*, respectivamente. No terceiro e quinto lugar ficaram Mucugê (0,70), pertencente à mesorregião Centro Sul Baiano, e Ibicoara (0,57), também situada nessa mesma região. Esses municípios ficam localizados na parte mais interior do estado e estão destacados com a cor mais escura no mapa 1. As pontuações obtidas por todos os municípios no modelo PCA são apresentadas na Tabela A1, nos anexos.

Nesses municípios, a produção agropecuária, a pesca, a produção de hortaliças, o turismo ecológico e a agricultura irrigada se destacam como as principais fontes de geração de renda. A região do Extremo Oeste Baiano, por exemplo, se destaca principalmente pela agroindústria de grãos, especialmente a soja. A introdução da soja nessa região, na década de 1980, com um perfil mais moderno e industrial, trouxe consigo indústrias de processamento e beneficiamento de grãos, o que contribuiu para o rápido avanço dessa região (Pereira; Lima e Bastos, 2016).

Gráfico 2: Distribuição dos municípios conforme o índice de sustentabilidade

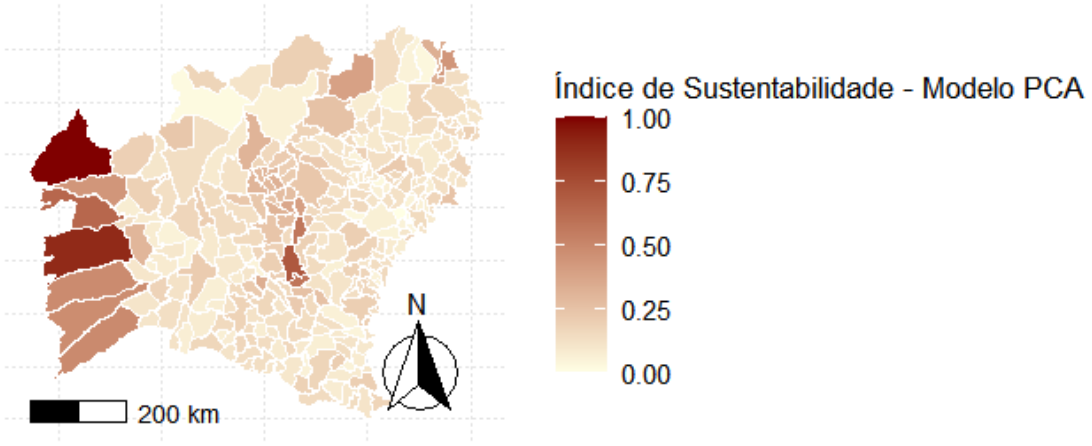


Fonte: Resultados da pesquisa.

Como apresentado no gráfico 2, verifica-se que a maioria dos municípios do semiárido baiano se concentrada nas faixas mais baixas do índice de sustentabilidade. Dos 287 municípios, quase 90% (256) encontram-se no nível muito baixo, com índices entre 0 e 0,25, enquanto 8,7% (25) estão classificados no nível baixo entre (0,25 a 0,50). Isso significa que 98,7% da amostra apresenta baixo nível de sustentabilidade, reforçando um cenário de fragilidade e de grande gargalo da região em termos de sustentabilidade. Apenas 2,1% dos municípios obtiveram níveis médio e alto de sustentabilidade.

A distribuição espacial do índice de sustentabilidade dos municípios do semiárido baiano pode ser visualizada no mapa 1, confirmando a predominância de baixos índices de sustentabilidade na região como um todo. Quanto mais escuro o tom representado no mapa, maior é o índice de sustentabilidade.

Mapa 1: Distribuição espacial do índice de sustentabilidade rural dos munícipios do semiárido baiano



Fonte: Resultados da pesquisa.

Dentre os seis munícipios com maior índice de sustentabilidade rural, três pertencem à região do Matopiba, (Formosa do Rio Preto, São Desidério e Barreiras) importante fronteira agrícola do Brasil que tem crescido significativamente com o avanço da produção de grãos e tem recebido muitos incentivos governamentais. De acordo com Oliveira, Alves e Sousa (2024), desde que foi demarcada, a região do Matopiba recebeu importantes incentivos por meio de políticas públicas, que, em teoria, tendem a favorecer seu desempenho. Esses autores destacam o Plano de Desenvolvimento da Agropecuária (PDA) como uma importante política de incentivo para a região cujo objetivo é promover e coordenar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico, ambiental e social sustentável, baseadas em atividades agrícolas, pecuárias e agroindustriais que resultem na melhoria da qualidade de vida da população.

Esses resultados encontrados corroboram com os achados de Pereira, Lima e Bastos (2016), que identificaram no seu estudo que a região Extremo Oeste Baiano possui os municípios com maior potencial de desenvolvimento agrário, com posição de destaque em relação as demais mesorregiões.

Analisando o *ranking* dos municípios com maiores e menores índices de sustentabilidade, observa-se que os municípios mais bem posicionados estão concentrados na mesorregião Extremo Oeste Baiano (sete municípios), no Centro Sul Baiano (cinco municípios), no Centro Norte Baiano (quatro municípios) e no Vale São-Franciscano da Bahia (quatro municípios). Em sua maioria, esses municípios apresentam PIB *per capita* superior à média da região do semiárido baiano (2010-2021) que foi de R$ 9.129,86.

Outro aspecto relevante é que, em oito dos vinte municípios mais bem colocados, o valor adicionado bruto da agropecuária supera os demais setores econômicos, evidenciando a importância da atividade agrícola e pecuária na estrutura produtiva local. E são eles: Formosa do Rio Preto, São Desidério, Mucugê, Ibicoara, Cocos, Correntina, Jaborandi e Riachão das Neves. Nesses municípios, predominam atividades como o cultivo de grãos (soja, milho e algodão), a produção de hortaliças e o turismo ecológico, fatores que contribuem para dinamizar a economia local.

Já os municípios com menores índices de sustentabilidade concentram-se nas mesorregiões Centro Norte Baiano (seis municípios), Centro Sul Baiano (cinco municípios), Vale São-Franciscano da Bahia (quatro municípios), Nordeste baiano (três municípios) e Extremo Oeste Baiano (um município). A exceção de Rafael Jambeiro todos os demais municípios possuem PIB *per capita* inferior à média da região do semiárido baiano. Nestes municípios o valor adicionado bruto da administração pública supera o valor adicionado dos demais setores, evidenciando a dependência econômica do setor público e uma falta de dinamismo local que podem justificar o baixo desempenho desses municípios.

Tabela 4: *Ranking* dos vinte municípios que apresentaram os maiores e menores índice de sustentabilidade na região do semiárido baiano, 2020

Ranking	**Municípios**	**Mesorregião**	**IDS-PCA**
1°	Formosa do Rio Preto	Extremo Oeste Baiano	1,00
2º	São Desidério	Extremo Oeste Baiano	0,89
3°	Mucugê	Centro Sul Baiano	0,70
4°	Barreiras	Extremo Oeste Baiano	0,64
5°	Ibicoara	Centro Sul Baiano	0,58
6º	Lençóis	Centro Sul Baiano	0,57
7°	Cocos	Extremo Oeste Baiano	0,49
8°	Correntina	Extremo Oeste Baiano	0,48
9°	Jaborandi	Extremo Oeste Baiano	0,48
10°	Riachão das Neves	Extremo Oeste Baiano	0,43
11°	Glória	Vale São-Franciscano da Bahia	0,43
12°	Bonito	Centro Sul Baiano	0,40
13º	Juazeiro	Vale São-Franciscano da Bahia	0,39
14°	Mulungu do Morro	Centro Norte Baiano	0,36
15°	Érico Cardoso	Centro Sul Baiano	0,33
16°	Rodelas	Vale São-Franciscano da Bahia	0,33
17°	Lapão	Centro Norte Baiano	0,32
18°	Souto Soares	Centro Norte Baiano	0,31
19°	Itaguaçu da Bahia	Vale São-Franciscano da Bahia	0,31
20°	Ibipeba	Centro Norte Baiano	0,30
:	**:**		**:**
268°	Manoel Vitorino	Centro Sul Baiano	0,05
269°	Candeal	Nordeste Baiano	0,05

270°	Caatiba	Centro Sul Baiano	0,05
271°	Sítio do Mato	Vale São-Franciscano da Bahia	0,05
272°	Ipecaetá	Centro Norte Baiano	0,05
273°	Brejolândia	Extremo Oeste Baiano	0,05
274°	Santa Inês	Centro Sul Baiano	0,05
275°	Chorrochó	Vale São-Franciscano da Bahia	0,05
276°	Caldeirão Grande	Centro Norte Baiano	0,05
277°	Rafael Jambeiro	Centro Norte Baiano	0,05
278°	Rio do Pires	Centro Sul Baiano	0,05
279°	Uauá	Nordeste Baiano	0,05
280°	Boa Nova	Centro Sul Baiano	0,04
281°	Antônio Cardoso	Centro Norte Baiano	0,04
282°	Macururé	Vale São-Franciscano da Bahia	0,03
283°	Macajuba	Centro Norte Baiano	0,03
284°	Anguera	Centro Norte Baiano	0,03
285°	Gavião	Nordeste Baiano	0,03
286°	Pilão Arcado	Vale São-Franciscano da Bahia	0,02
287°	Serra Preta	Centro Norte Baiano	0,00

Fonte: Resultados da pesquisa.

De modo geral, observa-se que os municípios cuja estrutura produtiva é fortemente dependente da administração pública, possuem os menores índices de sustentabilidade. Em contrapartida, aqueles com maior diversificação na estrutura produtiva, especialmente os localizados no Extremo Oeste Baiano, onde concentra a atividade agropecuária em larga escala, tendem a registrar melhores níveis de sustentabilidade.

Pereira, Lima e Bastos (2016), já haviam identificado em seu estudo um grande potencial de desenvolvimento na mesorregião Extremo Oeste Baiano e Centro Sul baiano. Com destaque para o município de São Desidério que apresentava maior potencial de desenvolvimento.

4.2.2 Indicador construído a partir do modelo *Benefit-of-the-Doubt* adaptado a Função de Distância Direcional (DEA-BOD de distância direcional)

Nesta seção, são apresentados os resultados do modelo DEA-BOD de distância direcional. Em um primeiro momento, a estimação foi realizada utilizando o modelo sem restrição sobre os pesos dos indicadores e, posteriormente, com restrição sobre os pesos dos indicadores.

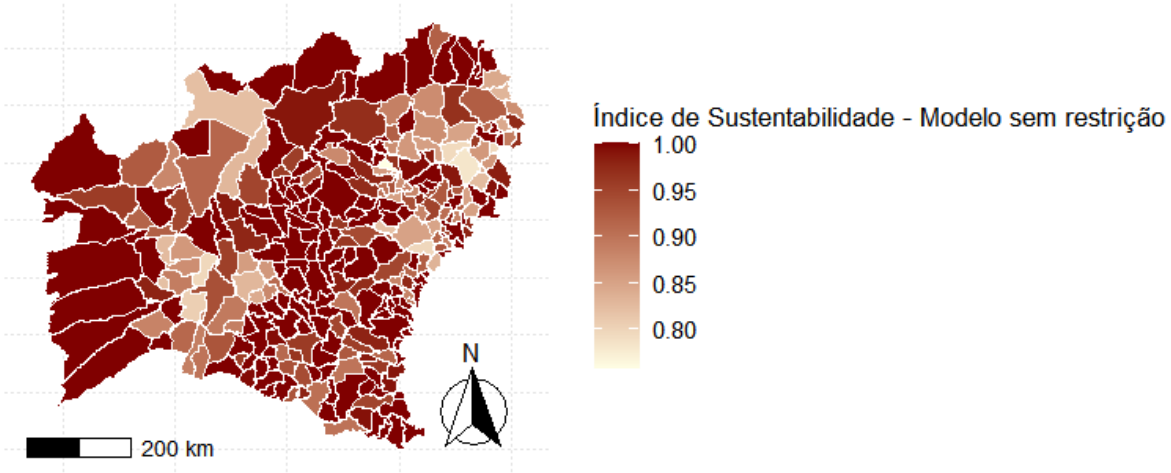
O modelo sem restrição de pesos permite total flexibilidade na escolha dos pesos atribuídos a cada indicador, o que significa que cada município é avaliado com a melhor combinação possível de pesos, de modo a maximizar sua pontuação de desempenho. Uma

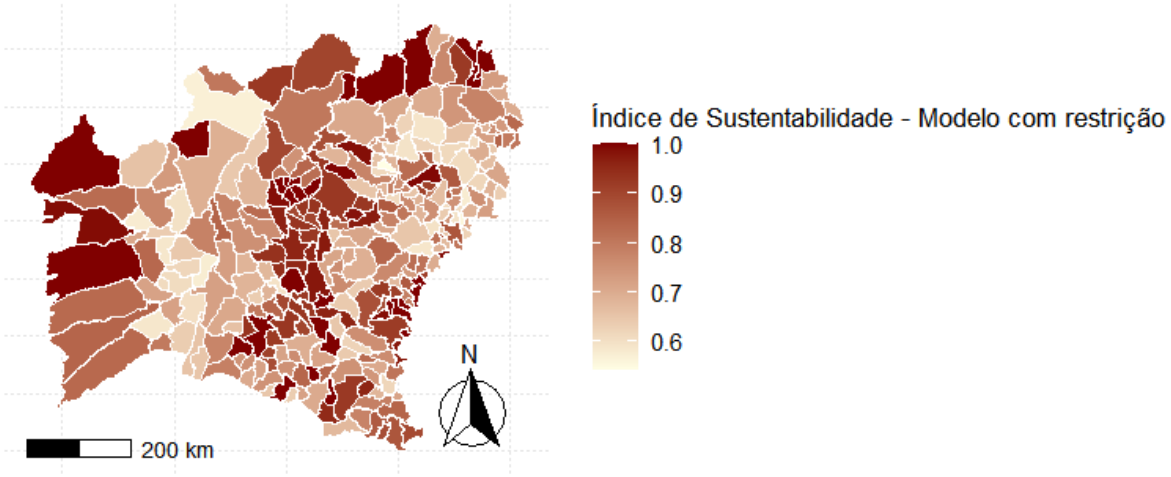
característica importante desse modelo é que ele tende a atribuir maior peso aos indicadores nos quais o município apresenta melhor desempenho, e menor peso àqueles em que os municípios apresentem desempenho inferior. Neste estudo, esse modelo foi utilizado para identificar os municípios que são realmente ineficientes.

Dessa forma, os municípios que não atingirem a pontuação máxima de desempenho (igual a 1) no modelo sem restrição confirmam que outros municípios da amostra estão obtendo um desempenho superior em relação à sustentabilidade. Pois, nenhum outro esquema de ponderação seria capaz de colocá-los em posição melhor, confirmado a sua ineficiência em termos de sustentabilidade.

Os resultados do cálculo do índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano medido pelo modelo DEA-BOD de distância direcional são apresentados no mapa 2. Como pode-se observar no mapa há uma diferença importante entre o modelo sem restrição e com restrição, com uma concentração maior de municípios com alto desempenho no modelo sem restrição e uma maior discriminação entre eles no modelo com restrição. Quanto mais escura a cor do município no mapa, melhor o desempenho do município considerando as três dimensões avaliadas. Os municípios localizados na mesorregião Nordeste Baiano e Vale São-Franciscano da Bahia são os que apresentam pior desempenho em relação aos demais municípios da região do semiárido baiano.

Mapa 2: Distribuição espacial do índice de sustentabilidade dos municípios do semiárido baiano





Fonte: Resultados da pesquisa.

Observa-se no mapa 2 que, tanto no modelo com restrição quanto no modelo sem restrição, a mesorregião Extremo Oeste Baiano se destaca com os melhores resultados em termos de desempenho sustentável. Esse destaque pode ser atribuído a um conjunto de fatores históricos, econômicos e estruturais que transformaram profundamente a dinâmica socioeconômica local. Como apontado no estudo de Pereira, Lima e Bastos (2016), após a década de 1970, a região Extremo Oeste Baiano passou por significativas transformações socioeconômicas impulsionadas, em grande medida, pela intervenção governamental, que viabilizou a expansão da agricultura mecanizada na região. Isso consolidou o Extremo Oeste Baiano como um importante polo agrícola regional, com destaque principalmente para a produção de grãos. O Extremo Oeste Baiano é uma importante área de produção agrícola moderna, onde se destacam Barreiras e Luís Eduardo Magalhães – dois grandes polos do agronegócio local.

No modelo sem restrição de pesos, dos 287 municípios analisados, 136 atingiram a pontuação máxima de desempenho, enquanto os demais obtiveram valores inferiores a 1, indicando algum grau de ineficiência. As pontuações obtidas por todos os municípios no modelo sem restrição são apresentadas na Tabela A2, no anexo. Neste caso, todos os municípios com pontuação de desempenho inferiores a 1 podem ser considerados verdadeiramente ineficientes, pois, neste modelo, os municípios são avaliados da melhor forma possível e nenhum outro esquema de ponderação os colocaria em posição melhor do que o modelo DEA-BOD de distância direcional sem restrição de pesos.

Tabela 5: Lista dos vinte municípios com pior desempenho no modelo DEA-BOD sem restrição de pesos

Município	**Índice**	***Ranking***
Paulo Afonso (BA)	0,845	268
Sítio do Quinto (BA)	0,844	269
Botuporã (BA)	0,841	270
Cipó (BA)	0,840	271
Castro Alves (BA)	0,834	272
Santa Brígida (BA)	0,832	273
Macaúbas (BA)	0,830	274
Xique-Xique (BA)	0,829	275
Tabocas do Brejo Velho (BA)	0,825	276
Nova Soure (BA)	0,825	277
Pilão Arcado (BA)	0,821	278
Canápolis (BA)	0,820	279
Macajuba (BA)	0,820	280
Serra do Ramalho (BA)	0,805	281
Heliópolis (BA)	0,798	282
Rafael Jambeiro (BA)	0,797	283
Sítio do Mato (BA)	0,797	284
Quijingue (BA)	0,794	285
Tucano (BA)	0,783	286
Caldeirão Grande (BA)	0,758	287

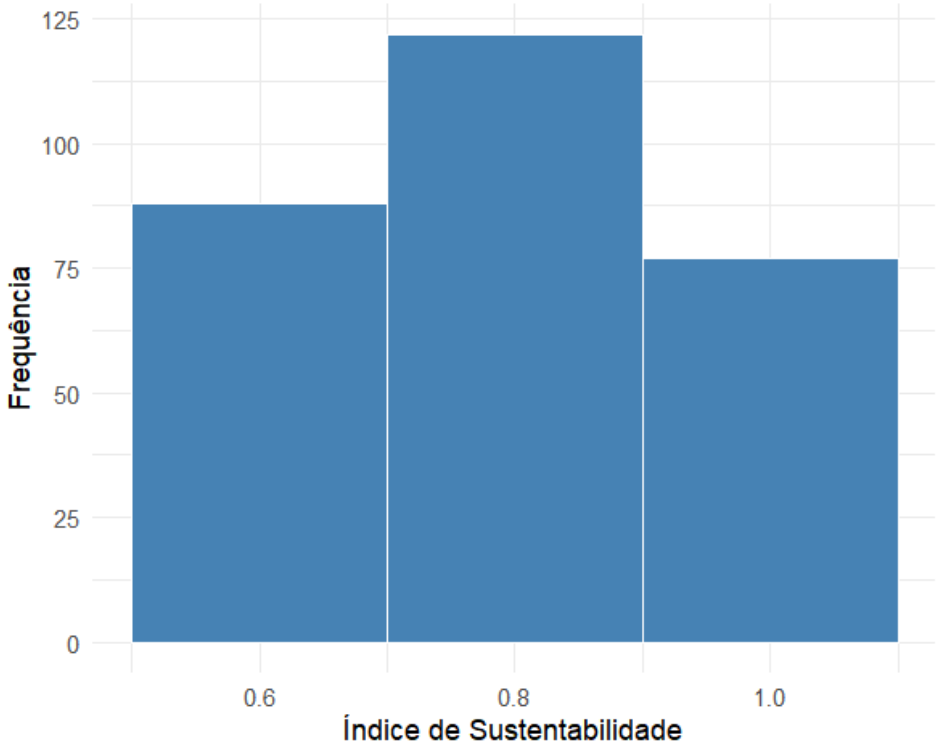
Fonte: Resultados da pesquisa.

Na tabela 5 são listados os municípios que obtiveram os piores resultados no modelo DEA-BOD de distância direcional sem restrição de pesos. Em termos de sustentabilidade rural, pode-se dizer que eles são de fato ineficientes, pois, mesmo quando lhes são atribuídas as melhores combinações de pesos, outros municípios ainda apresentam um desempenho superior. Tomando Paulo Afonso como exemplo, observa-se por meio dos seus *scores* que o município está operando a 84,5% do nível de eficiência dos municípios de melhor desempenho (*benchmarks*). Da mesma forma, Caldeirão Grande, que ocupa a última posição no *ranking,* está operando a 75,8% do nível dos municípios de melhor desempenho. Mostrando que estes municípios ainda precisam investir em melhorias nas diferentes dimensões da sustentabilidade para se tornarem eficientes em termos de sustentabilidade.

Contudo, quando se aplica o modelo com restrição de pesos (limite mínimo de 2%, neste caso cada indicador terá no mínimo um peso de 2% na avaliação da sustentabilidade), os critérios tornam-se mais rígidos, e aumenta-se a discriminação entre as unidades avaliadas. No modelo com restrição de pesos, dos 287 municípios avaliados, apenas 29 municípios atingiram

a pontuação máxima de desempenho. Mostrando a capacidade do modelo com restrição de pesos de distinguir os níveis de desempenho dos municípios, revelando disparidades importantes, inclusive inter-regionais.

Gráfico 3: Distribuição dos municípios conforme o índice de sustentabilidade – modelo DEA-BOD de distância direcional com restrição de pesos



Fonte: Resultados da pesquisa.

Como apresentado no gráfico 3, os municípios do semiárido baiano em sua maioria apresentam níveis de desempenho entre 0,6 e 0,8, indicando que a maioria dos municípios ainda possuem fraco desempenho em termos de sustentabilidade rural, ou seja, a maioria dos municípios ainda estão operando a cerca de 60% a 80% do nível dos municípios de melhor desempenho.

A Tabela 6 apresenta os resultados para os 40 municípios que alcançaram as maiores pontuações no índice DEA-BOD de distância direcional com restrição de peso (equação 16). Nela tem-se o resultado do índice composto e a posição no *ranking*.

Dos 287 municípios analisados, 29 alcançaram a pontuação máxima de desempenho e estão listadas na tabela 6 e empatadas na primeira posição. Dos 29 municípios, 14 possuem PIB *per capita* superior à média de todos os municípios do semiárido baiano (R$ 12.945,09), e, em

geral, são municípios com pouco mais de 15 mil habitantes, exceto Juazeiro que tem 237.821 habitantes, Maetinga com 6.973 habitantes e Itaquara com 8.153 habitantes (IBGE, 2022). Deste modo, comparando o desempenho dos municípios com base no número de habitantes, não se observaram vantagens expressivas dos municípios maiores em detrimento dos menores.

Neste sentido, o modelo utilizado para avaliar o desempenho dos municípios é relevante para identificar pontos fortes e fracos e características de melhor desempenho, pois os pesos são atribuídos de forma a garantir que os municípios em avaliação tenham um desempenho tão bom quanto possível em comparação aos demais. Deste modo, os indicadores de melhor desempenho dos municípios receberão pesos maiores, enquanto os de menor desempenho receberão pesos menores, respeitando o mínimo de 2% estabelecido pela restrição (equação 17).

Os resultados de todos os municípios analisados podem ser vistos na Tabela A2 nos anexos deste estudo. As pontuações de desempenho dos municípios variam de 1 (melhor pontuação de desempenho) a 0,54 (pior pontuação de desempenho), com uma média de 0,79, isso significa que, na média, os municípios do semiárido baiano estão operando a 79% do nível dos municípios de melhor desempenho. Dentre os municípios com as menores pontuações de desempenho, tem-se: Monte Santo (0, 59), Rafael Jambeiro (0,59), Coribe (0,58), Tabocas do Brejo Velho (0,58), Angical (0,58), Biritinga (0,58), Sítio do Mato (0,57), Pilão Arcado (0,57), Santanópolis (0,56) e Caldeirão Grande (0,54), os quais ocupam as últimas posições no *ranking* geral, e possuem grande potencial de melhoria.

Tabela 6: *Ranking* dos municípios que atingiram a maior e a menor pontuação no índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano

Ranking	Município	Mesorregião	IDS-DEA
1°	América Dourada	Centro Norte Baiano	1
1°	Jitaúna	Centro Sul Baiano	1
1°	Buritirama	Vale São-Franciscano da Bahia	1
1°	Caetité	Centro Sul Baiano	1
1°	Condeúba	Centro Sul Baiano	1
1°	Curaçá	Vale São-Franciscano da Bahia	1
1°	Formosa do Rio Preto	Extremo Oeste Baiano	1
1°	Glória	Vale São-Franciscano da Bahia	1
1°	Guanambi	Centro Sul Baiano	1
1°	Ibititá	Centro Norte Baiano	1
1°	Irecê	Centro Norte Baiano	1

1°	Itaquara	Centro Sul Baiano	1
1°	Itiruçu	Centro Sul Baiano	1
1°	Ituaçu	Centro Sul Baiano	1
1°	Juazeiro	Vale São-Franciscano da Bahia	1
1°	Lapão	Centro Norte Baiano	1
1°	Maetinga	Centro Sul Baiano	1
1°	Piatã	Centro Sul Baiano	1
1°	Presidente Dutra	Centro Norte Baiano	1
1°	Rodelas	Vale São-Franciscano da Bahia	1
1°	São Desidério	Extremo Oeste Baiano	1
1°	Sobradinho	Vale São-Franciscano da Bahia	1
1°	Tanhaçu	Centro Sul Baiano	1
1°	Ubaíra	Centro Sul Baiano	1
1°	Uibaí	Centro Norte Baiano	1
1°	Amargosa	Centro Sul Baiano	1
1°	Belo Campo	Centro Sul Baiano	1
1°	Ibicoara	Centro Sul Baiano	1
1°	Jaguaquara	Centro Sul Baiano	1
30°	Várzea Nova	Centro Norte Baiano	0,995
31°	Santaluz	Nordeste Baiano	0,994
32°	Cabaceiras do Paraguaçu	Metropolitana de Salvador	0,991
33°	Barreiras	Extremo Oeste Baiano	0,990
34°	Lafaiete Coutinho	Centro Sul Baiano	0,990
35°	Ibipeba	Centro Norte Baiano	0,988
36°	Mirangaba	Centro Norte Baiano	0,987
37°	Tapiramutá	Centro Norte Baiano	0,983
38°	Mucugê	Centro Sul Baiano	0,979
39°	Itagi	Centro Sul Baiano	0,977
40°	Lençóis	Centro Sul Baiano	0,975
:	**:**		**:**
268°	Tucano	Nordeste Baiano	0,609
269°	Santana	Extremo Oeste Baiano	0,607
270°	Lamarão	Nordeste Baiano	0,607
271°	Ichu	Nordeste Baiano	0,606
272°	Serra do Ramalho	Vale São-Franciscano da Bahia	0,602
273°	Wanderley	Extremo Oeste Baiano	0,598
274°	Serra Preta	Centro Norte Baiano	0,596
275°	Rio do Pires	Centro Sul Baiano	0,596
276°	Santa Bárbara	Centro Norte Baiano	0,594
277°	Itiúba	Centro Norte Baiano	0,594
278°	Monte Santo	Nordeste Baiano	0,592
279°	Rafael Jambeiro	Centro Norte Baiano	0,588
280°	Coribe	Extremo Oeste Baiano	0,586
281°	Tabocas do Brejo Velho	Extremo Oeste Baiano	0,586

282°	Angical	Extremo Oeste Baiano	0,578
283°	Biritinga	Nordeste Baiano	0,576
284°	Sítio do Mato	Vale São-Franciscano da Bahia	0,575
285°	Pilão Arcado	Vale São-Franciscano da Bahia	0,569
286°	Santanópolis	Centro Norte Baiano	0,557
287°	Caldeirão Grande	Centro Norte Baiano	0,541

Fonte: Resultados da pesquisa.

A análise do *ranking* dos municípios com melhores e piores desempenhos em termos de sustentabilidade rural na região do semiárido baiano revela o contraste entre as metodologias utilizadas neste estudo, comparando a tabela 4 com a tabela 6, que mostra o *ranking* dos municípios com melhores e piores desempenhos em sustentabilidade rural, observa-se, no caso dos municípios com melhores desempenhos, uma certa semelhança entre os dois indicadores, embora a posição no *ranking* não seja necessariamente a mesma, dentre os melhores colocados em cada caso, tem-se onze que aparecem com melhor desempenho nos dois indicadores, confirmando o seu bom desempenho em termos de sustentabilidade rural, e são eles: Formosa do Rio Preto, São Desidério, Mucugê, Barreiras, Ibicoara, Lençóis, Glória, Juazeiro, Rodelas, Lapão e Ibipeba.

Os municípios de Cocos, Correntina, Jaborandi, Riachão das Neves, Bonito, Mulungu do Morro, Érico Cardoso, Souto Soares e Itaguaçu da Bahia que estavam entre os vinte primeiros colocados no *ranking* da tabela 4 não aparecem na lista dos vinte municípios com maior índice de sustentabilidade da tabela 6.

Analisando os últimos colocados, os municípios Sítio do Mato, Caldeirão Grande, Rafael Jambeiro, Rio do Pires, Pilão Arcado e Serra Preta aparecem nos dois indicadores com os piores resultados, confirmado o seu baixo desempenho em termos de sustentabilidade, independentemente do método aplicado. E aqui, destaca-se uma vantagem do modelo DEA-BOD de distância direcional, pois ao atribuir o melhor esquema de ponderação elimina-se a possibilidade desse município argumentar que o seu baixo desempenho é resultado de uma ponderação desfavorável. Desse modo, sendo ineficiente neste cenário, não restam dúvidas sobre a ineficiência.

A convergência parcial entre os resultados reforça a validade de alguns casos, mas também evidencia que a escolha metodológica influencia diretamente a hierarquização dos municípios em relação ao nível de sustentabilidade.

Uma vantagem do modelo DEA-BOD de distância direcional em relação ao modelo PCA é que além de permitir conhecer os municípios de melhor desempenho, ele ajuda a identificar quais práticas poderiam ser adaptadas ou replicadas em contextos semelhantes para melhorar o desempenho geral dos municípios com baixo desempenho. Ao observar os indicadores nos quais os seus respectivos *peers* (pares) se destacam, os municípios ineficientes podem desenvolver planos de ação mais assertivos e alinhados com suas limitações e potencialidades. Os *peers* correspondem aos municípios que atingiram o *score* máximo de desempenho e que podem servir de exemplo de melhores práticas para os que não atingiram o score máximo. Isso transforma o modelo DEA-BOD de distância direcional em uma ferramenta eficiente tanto do ponto de vista da gestão quanto da avaliação quantitativa do desempenho.

As tabelas 7 a 10 apresentam os *Peers* de quatro municípios ineficientes selecionados para fins de ilustração. São eles: Paulo Afonso (cujos pares são Belo Campo, Buritirama, Rodelas e São Desidério), Vitória da Conquista (cujos pares são Belo Campo, Maetinga, Rodelas e São Desidério), Feira de Santana (Guanambi, Irecê, Maetinga, Rodelas e São Desidério) e Jequié (cujos pares são Formosa do Rio Preto, Maetinga e São Desidério).

Nessas tabelas, são apresentadas os valores originais (valor observado) e as metas (*targets*) para os municípios de Paulo Afonso, Feira de Santana, Jequié e Vitória da Conquista, respectivamente. As metas representam a projeção da DMU em avaliação (j_0) sobre a fronteira, ou seja, que valores essa DMU deveria ter nos indicadores para estar operando na fronteira. Essa projeção é obtida pela melhoria proporcional nos indicadores desejáveis e indesejáveis, definida como $metas = y_{rj0} + \lambda_j * y_{rj0}$, sendo λ_j representam municípios com um perfil mais próximo ao município em avaliação solução ótima do modelo envolvente.

Os valores dos λ, apresentados nas tabelas 7 a 10, são obtidos pela solução ótima do modelo (15) e indicam a importância de cada *peers* no cálculo das metas. Aqueles que apresentarem maior valor de λ devem receber maior atenção no processo de melhoria.

Também são apresentados os valores dos indicadores para os municípios pares. Com base nesses valores, é possível identificar boas práticas específicas para cada indicador analisado. Os valores dos indicadores que são melhores nos municípios pares do que em Paulo Afonso, Feira de Santana, Jequié e Vitória da Conquista estão destacados em negrito.

Tabela 7: Desempenho do município de Paulo Afonso no índice de sustentabilidade rural (DEA-BOD = 0,73)

Indicador	**Paulo Afonso**		***Peers***			
			Belo Campo	**Buritirama**	**Rodelas**	**São Desidério**
	Observado	***Target***	***λ=0,008***	***λ=0,118***	***λ=0,103***	***λ=0,771***
Alfabetizados	0,58	0,69	**0,66**	0,36	**0,84**	**0,58**
Médicos_habitantes	2,56	3,03	1,41	0,51	**3,10**	**2,62**
Pessoal_ocupado	2,53	2,99	2,21	**4,21**	**2,69**	**5,31**
Práticas_sustentáveis	0,52	0,62	0,26	**0,84**	0,05	0,49
Área_lavoura	0,15	0,18	0,13	0,03	**0,33**	**0,56**
Mata e sistemas	0,41	0,48	0,21	**0,69**	0,05	0,30
Recursos_hídricos	1,13	1,34	**1,36**	**1,18**	1,13	**1,32**
Área_lâmina_agua	0,07	0,09	**0,30**	**0,18**	**0,24**	0,03
Valor_prod_pessoa_ocupada	7,31	8,66	5,17	1,92	**9,61**	**198,69**
Valor_produção_àrea	0,75	0,88	0,66	0,13	**2,73**	**2,45**
Valor_produção_CO2	0,02	0,02	0,01	0,01	**0,08**	**0,16**
Comercialização	0,19	0,23	**0,32**	0,01	**0,88**	0,18
Emissões_área	36,91	30,11	58,69	**11,40**	**34,35**	**15,55**
Desmatamento	0,26	0,21	0,57	**0,19**	0,47	0,38
Pastagens_degradadas	0,84	0,69	0,91	**0,59**	0,89	0,94
Áreas_antropicas	2,00	1,63	2,09	**0,28**	10,41	**0,71**
Proporção_animais	0,46	0,38	0,52	**0,16**	**0,41**	**0,06**

Fonte: Resultados da pesquisa.

Na tabela 7 observa-se que o desempenho do município de Paulo Afonso em relação à sustentabilidade rural foi de 0,73, isso significa que esse município está operando a 73% do nível de desempenho dos municípios de referência, mostrando que ainda existe margem para a melhoria de seus indicadores comparados aos demais municípios analisados. O modelo indicou que os *benchmarks* para Paulo Afonso foram os municípios de Belo Campo, Buritirama, Rodelas e São Desidério. Em termos metodológicos, isso significa que a projeção do município de Paulo Afonso sobre a fronteira de melhores práticas é construída a partir de uma combinação linear dos indicadores dos municípios de Belo Campo, Buritirama, Rodelas e São Desidério. Em termos práticos, isso significa que, entre as unidades de melhor desempenho da amostra, Belo Campo, Buritirama, Rodelas e São Desidério são as que mais se assemelham ao município de Paulo Afonso e representam modelos a serem seguidos.

Na tabela 7, também são apresentados os valores dos indicadores desejáveis e indesejáveis do município de Paulo Afonso e de seus pares: Belo Campo, Buritirama, Rodelas e São Desidério. Os valores destacados em negrito na tabela representam os indicadores em que

os municípios pares apresentam desempenho superior ao de Paulo Afonso. Analisando as emissões de CO2 por área, observa-se que Buritirama, Rodelas e São Desidério apresentam uma proporção de emissões por área muito melhor do que o valor observado para Paulo Afonso (36,91). Nesse caso, o ideal seria que Paulo Afonso se espelhasse nesses municípios e buscasse atingir uma proporção de emissões de CO2 semelhante à desses municípios para melhorar o seu desempenho geral.

Os municípios pares de Paulo Afonso apresentam uma média populacional de 20.284 habitantes. Dentre eles, o município de São Desidério se destaca com o maior PIB *per capita* (R$ 168.146,14), seguido por Rodelas (R$ 15.034,87), Belo Campo (R$ 9.968,92) e Buritirama (R$ 7.251,29). Em geral, a atividade econômica desses municípios se concentra na atividade agrícola e pecuária (IBGE, 2022).

São Desidério, que se destaca tanto em termos *per capita* quanto no valor da produção, está localizado na mesorregião Extremo Oeste da Bahia e tem como principal atividade econômica a agricultura, especialmente a irrigada. O município é um grande produtor de algodão, com mais de 108 mil hectares plantados (PAM, 2022). Nesse município, o cultivo do algodão divide espaço com a produção de soja, milho, feijão e arroz. Com mais de 15 mil km^2 em extensão territorial, apresenta um grande volume de produção agrícola, alcançando um valor de produção de R$ 7,7 milhões em 2023 (PAM, 2023). O PIB *per capita* do município é de R$ 168.146,14.

Os municípios pares superam Paulo Afonso na maioria dos indicadores desejáveis e indesejáveis, podendo, portanto, servir como referência de boas práticas a serem seguidas. Especialmente em relação aos indicadores indesejáveis, que se busca minimizar. Paulo Afonso poderia melhorar seu índice de sustentabilidade adotando políticas similares às de São Desidério no que se refere a proporção de animais por área. Além disso, poderia seguir o exemplo de Buritirama quanto a redução de emissões de CO2 por área, a proporção de desmatamento por hectare, a proporção de pastagens degradadas e a proporção de áreas antrópicas.

Tabela 8: Desempenho do município de Feira de Santana no índice de sustentabilidade rural (DEA-BOD = 0,87)

Indicador	**Feira de Santana**		***Peers***				
			Guanambi	Irecê	Maetinga	Rodelas	São Desidério
	Observado	***Target***	***λ = 0,017***	***λ = 0,054***	***λ = 0,005***	***λ = 0,171***	***λ = 0,754***
Alfabetizados	0,73	0,84	**0,75**	**0,89**	0,61	**0,84**	0,58
Médicos_habitantes	3,63	4,17	**4,65**	**5,02**	**4,73**	3,10	2,62
Pessoal_ocupado	2,87	3,30	2,67	2,21	2,03	2,69	**5,31**
Práticas_sustentáveis	0,62	0,71	**0,66**	**0,76**	**0,75**	0,05	0,49
Área_lavoura	0,09	0,10	0,08	**0,45**	0,06	**0,33**	**0,56**
Mata e sistemas	0,08	0,10	**0,21**	**0,12**	**0,41**	0,05	**0,30**
Recursos_hídricos	1,18	1,36	**1,96**	1,13	**1,65**	1,13	**1,32**
Área_lâmina_agua	0,09	0,10	0,08	0,02	**0,09**	**0,24**	0,03
Valor_prod_pessoa_ocupada	2,81	3,23	**3,44**	**11,50**	2,33	**9,61**	**198,70**
Valor_produção_àrea	1,10	1,27	0,49	**1,25**	0,21	**2,73**	**2,45**
Valor_produção_CO2	0,01	0,02	0,01	**0,02**	0,01	**0,08**	**0,16**
Comercialização	0,26	0,29	0,26	**0,74**	**0,86**	**0,89**	0,18
Emissões_área	78,66	66,81	**43,08**	**66,12**	**32,36**	**34,35**	**15,55**
Desmatamento	0,15	0,13	**0,06**	**0,04**	0,30	0,47	0,38
Pastagens_degradadas	0,47	0,40	0,88	1,00	0,66	0,89	0,94
Áreas_antropicas	1,67	1,42	**1,18**	1,72	**1,36**	10,41	**0,71**
Proporção_animais	0,69	0,59	0,63	**0,45**	**0,27**	**0,41**	**0,06**

Fonte: Resultados da pesquisa.

O município de Feira de Santana também apresentou baixo desempenho em relação a sustentabilidade rural (0,87), isso significa que esse município está operando a 87% do nível do município de referência, indicando que outros municípios da amostra apresentam desempenho superior. Seus pares de melhores práticas foram os municípios de Guanambi, Irecê, Maetinga, Rodelas e São Desidério. Em termos metodológicos, isso significa que a projeção do município de Feira de Santana sobre a fronteira de melhores práticas é representada por uma combinação linear de indicadores das unidades de referência: Guanambi, Irecê, Maetinga, Rodelas e São Desidério. Indicando que entre as unidades de melhor desempenho, são essas as que mais se assemelham ao município de Feira de Santana.

Em ambas as cidades a atividade agrícola e pecuária são as bases da atividade econômica local. Os valores em negrito na tabela 8 indicam valores de referência de boas práticas a serem seguidas para o município de Feira de Santana, tanto para os fatores desejáveis quanto indesejáveis. Comparando os valores observados de seus pares, verifica-se que Feira de Santana

ainda precisa avançar em todas as três dimensões da sustentabilidade. Os valores observados para o município estão abaixo do ideal para se tornar eficiente e aproximar o município dos padrões observados em seus pares.

Em relação aos fatores indesejáveis, observa-se que Feira de Santana possui desempenho superior a seus pares apenas no indicador proporção de pastagens degradadas. Para os demais indicadores, especialmente emissões de CO2 por área e proporção de animais por hectare, Feira de Santana apresentou os piores resultados em relação a seus pares, registrando os valores mais elevados nesses dois aspectos, o que sugere maior pressão ambiental decorrente da criação animal e de atividades emissoras de gases de efeito estufa.

Tabela 9: Desempenho do município de Jequié no índice de sustentabilidade rural (DEA-BOD = 0,92)

Indicador	**Jequié**		**Peers**		
			Formosa do Rio Preto	Maetinga	São Desidério
	Observado	***Target***	***λ = 0,478***	***λ = 0,423***	***λ = 0,099***
Alfabetizados	0,65	0,71	0,63	0,61	0,58
Médicos_habitantes	3,68	4,01	1,43	**4,73**	2,62
Pessoal_ocupado	2,71	2,95	**5,45**	2,03	**5,31**
Práticas_sustentáveis	0,84	0,91	0,77	0,75	0,49
Área_lavoura	0,07	0,08	**0,52**	0,06	**0,56**
Mata e sistemas	0,37	0,41	**0,43**	**0,41**	0,30
Recursos_hídricos	1,73	1,88	1,33	1,65	1,32
Área_lâmina_agua	0,03	0,04	0,00	**0,09**	0,03
Valor_prod_pessoa_ocupada	4,97	5,41	**260,29**	2,33	**198,70**
Valor_produção_àrea	0,22	0,24	**1,99**	0,21	**2,45**
Valor_produção_CO2	0,01	0,01	**0,18**	**0,01**	**0,16**
Comercialização	0,78	0,85	0,22	**0,86**	0,18
Emissões_área	26,34	24,02	**11,08**	32,36	**15,55**
Desmatamento	0,25	0,22	0,51	0,30	0,38
Pastagens_degradadas	0,27	0,25	0,64	0,66	0,94
Áreas_antropicas	0,88	0,80	**0,65**	1,36	**0,71**
Proporção_animais	0,21	0,20	**0,06**	0,27	**0,06**

Fonte: Resultados da pesquisa.

O desempenho do município de Jequié em relação à sustentabilidade rural foi (0,92), indicando que esse município está operando a 92% do nível de desempenho dos municípios de referência. Embora esse valor seja relativamente alto, ainda está abaixo da fronteira de melhores práticas, o que indica que ainda há espaço para melhorias. Os *peers* identificados para Jequié foram os municípios de Formosa do Rio Preto, Maetinga e São Desidério, que representam

unidades de referência em boas práticas, servindo como base para o aprimoramento de políticas públicas locais.

A partir da análise comparativa com seus *peers*, observa-se que Jequié, apesar de apresentar desempenho superior em alguns indicadores, ainda enfrenta desafios significativos, sobretudo nas dimensões econômica e ambiental. Na dimensão econômica, o município apresenta desempenho inferior ao ideal em indicadores como o valor da produção por pessoa ocupada (4,97), dos valores dos seus *peers*, especialmente Formosa do Rio Preto (260,29) e São Desidério (198,70), evidenciando uma produtividade significativamente mais baixa.

Por outro lado, uma particularidade observada para Jequié é que o município apesar de ter espaço para melhorias obteve um bom desempenho no indicador proporção de práticas sustentáveis (0,84), proporção de recursos hídricos (1,73), proporção de desmatamento por hectare (0,25) com valores melhores do que seus *peers*, o que demonstra um bom posicionamento do município em termos de práticas de produção ambientalmente responsáveis. De modo geral, o que ser observa para Jequié apesar de ter algumas vantagens em indicadores ambientais e sociais da sustentabilidade, deve se concentrar esforços na elevação da produtividade e reduzir as emissões de CO2 por área, a proporção de áreas antrópicas e de animais por hectares, haja vista a pressão ambiental causada por esses fatores indesejáveis.

Tabela 10: Desempenho do município de Vitória da Conquista no índice de sustentabilidade rural (DEA-BOD = 0,92)

Indicador	**Vitória da Conquista**		***Peers***			
			Belo Campo	Maetinga	Rodelas	São Desidério
	Observado	***Target***	***λ = 0,022***	***λ = 0,581***	***λ = 0,019***	***λ = 0,378***
Alfabetizados	0,60	0,65	**0,66**	**0,61**	**0,84**	0,58
Médicos_habitantes	4,07	4,40	1,41	**4,73**	3,10	2,62
Pessoal_ocupado	2,89	3,12	2,21	2,03	2,69	**5,31**
Práticas_sustentáveis	0,73	0,79	0,26	**0,75**	0,05	0,49
Área_lavoura	0,11	0,12	**0,13**	0,06	**0,33**	**0,56**
Mata e sistemas	0,29	0,31	0,21	**0,41**	0,05	0,30
Recursos_hídricos	1,42	1,54	1,36	**1,65**	1,13	1,32
Área_lâmina_agua	0,08	0,09	**0,30**	**0,09**	**0,24**	0,03
Valor_prod_pessoa_ocupada	5,51	5,96	5,17	2,33	**9,61**	**198,70**
Valor_produção_àrea	0,50	0,54	**0,66**	0,21	**2,73**	**2,45**
Valor_produção_CO2	0,01	0,01	0,01	0,01	**0,08**	**0,16**
Comercialização	0,69	0,75	0,32	**0,86**	**0,89**	0,18

Emissões_área	39,78	36,55	**58,69**	32,36	34,35	15,55
Desmatamento	0,25	0,23	0,57	0,30	0,47	0,38
Pastagens_degradadas	0,84	0,77	0,91	**0,66**	0,89	0,94
Áreas_antropicas	0,93	0,86	2,09	1,36	10,41	**0,71**
Proporção_animais	0,45	0,42	0,52	**0,27**	**0,41**	**0,06**

Fonte: Resultados da pesquisa.

O desempenho do município de Vitória da Conquista em relação a sustentabilidade rural foi de (0,92), embora esteja próximo da fronteira de melhores práticas, ainda existem espaços que podem ser melhorados para que o município alcance níveis ótimos de sustentabilidade. Os municípios que mais se assemelham a Vitória da Conquista são Belo Campo, Maetinga, Rodelas e São Desidério. Isso significa que a projeção do município sobre a fronteira de melhores práticas é representada por uma combinação linear de indicadores das unidades de referência. Indicando que entre as unidades de melhor desempenho, são essas as que mais se assemelham ao município de Vitória da Conquista.

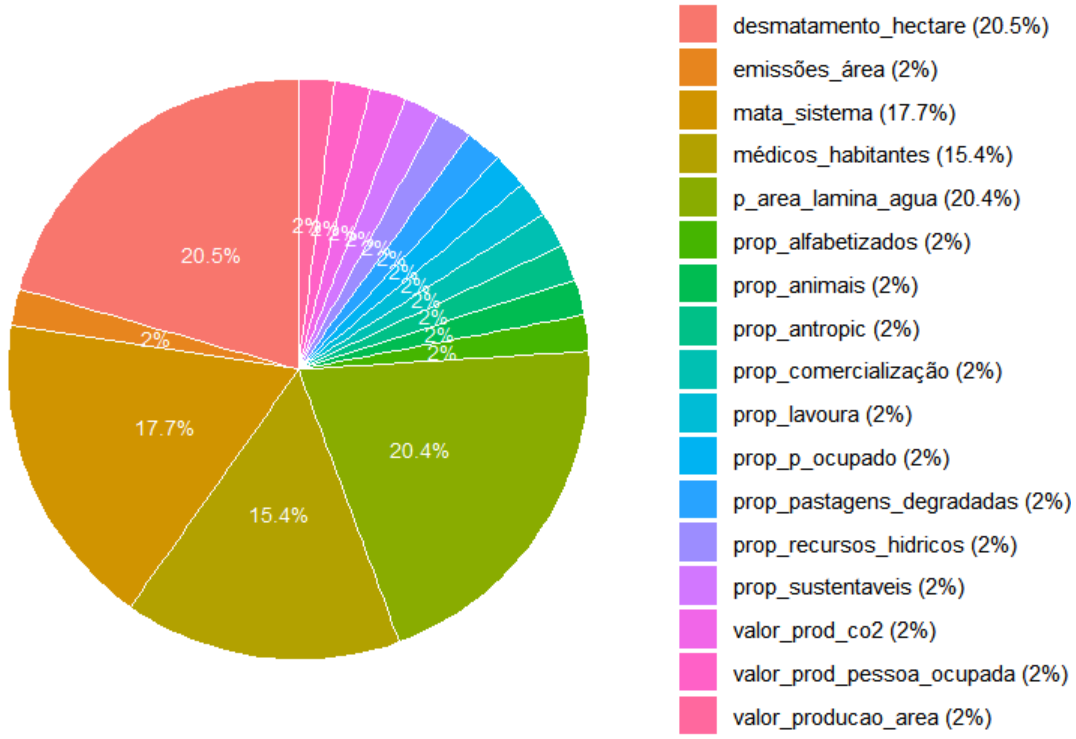
Analisando os *peers*, referências de boas práticas, verifica-se que Vitória da Conquista ainda precisa avançar em relação aos indicadores de sustentabilidade em todas as dimensões, exceto para o indicador proporção de desmatamento por hectares (0,25), que o município apresentou indicador melhor do que seus *peers*, ficando abaixo dos valores observados nas unidades de referência.

Dessa forma, uma análise mais específica dos exemplos de boas práticas, derivadas do modelo DEA-BOD de distância direcional com restrição de pesos, pode fornecer importante *insights* para os municípios buscarem melhorar seus níveis de sustentabilidade rural. Ao observar práticas implementas que apresentam resultados satisfatórios, os municípios ineficientes podem aprender com essas boas práticas e implementar políticas semelhantes para aumentar seus níveis de sustentabilidade. Com isso, poderão fornecer melhores serviços à comunidade com menor impacto ambiental.

Os gráficos 4, 5, 6 e 7 apresentam os indicadores que receberam maior peso na avaliação do desempenho de Paulo Afonso, Feira de Santana, Vitória da Conquista e Jequié, que representam os indicadores de melhor desempenho. Paulo Afonso obteve uma pontuação de desempenho sustentável de 0,73, ocupando a 172ª posição no *ranking*. Os maiores pesos foram atribuídos aos indicadores: proporção de desmatamento por hectares, proporção de área de lâmina d'água, mata e sistemas agroflorestais e número de médicos por habitantes. Isso sugere que essas áreas são pontos fortes do município, ou seja, que tem um bom desempenho

comparativamente aos demais municípios da amostra. Como modelos baseados em DEA-BOD possibilitam selecionar a combinação de pesos mais favorável para cada município analisado, qualquer outro conjunto de pesos resultaria em uma posição menos favorável no *ranking* de sustentabilidade, seja porque reduziria o *score* de desempenho do município em análise, seja porque beneficiaria ainda mais os demais municípios da amostra. Por outro lado, os demais indicadores receberam pesos mínimos, sendo um indicativo de baixo desempenho nessas variáveis em comparação com as demais da amostra.

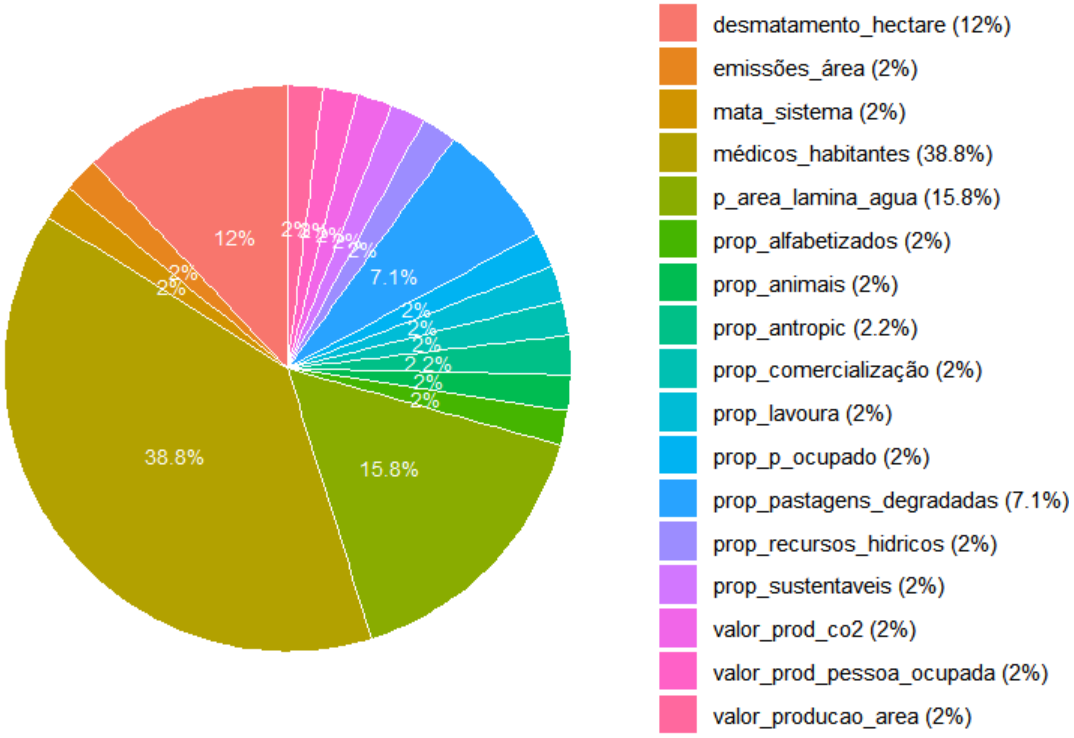
Gráfico 4: Contribuição dos indicadores para o índice de desenvolvimento rural sustentável do município de Paulo Afonso



Fonte: Resultados da pesquisa.

O município de Feira de Santana obteve uma pontuação de 0,87, ocupando a 88ª posição no *ranking*. Os maiores pesos foram atribuídos aos indicadores: número de médicos por habitantes, proporção de área de lâmina d'água e proporção de desmatamento por hectare, indicando que essas são áreas de melhor desempenho. Os demais indicadores obtiveram participação mínima na avaliação da sustentabilidade.

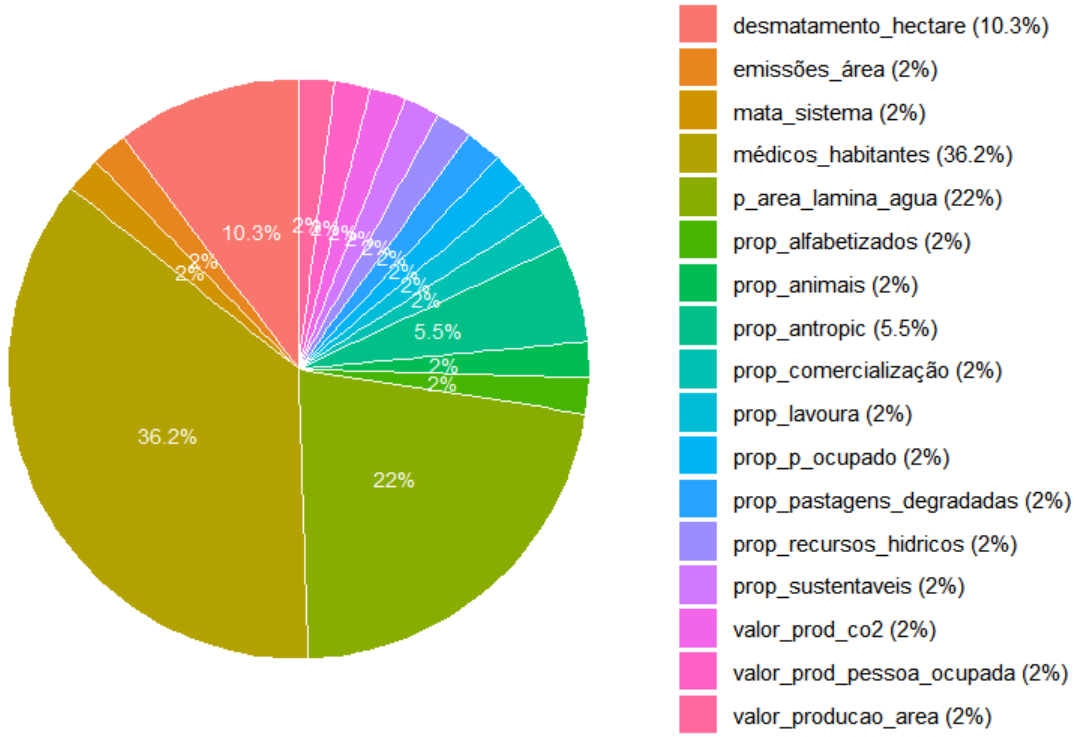
Gráfico 5: Contribuição dos indicadores para o índice de desenvolvimento rural sustentável do município de Feira de Santana



Fonte: Resultados da pesquisa.

Vitória da Conquista alcançou uma pontuação de 0,92, ocupando a 64ª posição. Os maiores pesos foram atribuídos às variáveis: número de médicos por habitantes, proporção de área de lâmina d'água, desmatamento por hectare e proporção de áreas antrópicas. Isso indica que essas áreas são pontos fortes do município, enquanto as demais variáveis receberam pesos mínimos.

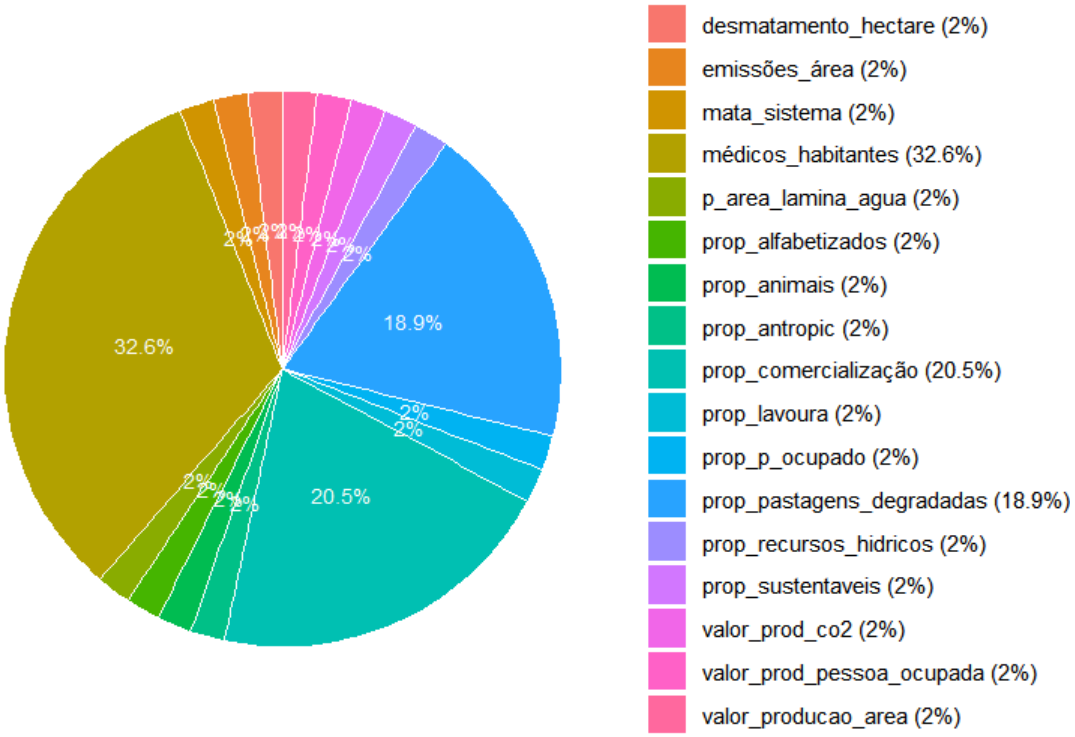
Gráfico 6: Contribuição dos indicadores para o índice de desenvolvimento rural sustentável do município de Vitória da Conquista



Fonte: Resultados da pesquisa.

Por fim, o município de Jequié obteve uma pontuação de 0,92, ocupando a 69° posição no *ranking*. Para esse município, os maiores pesos foram atribuídos às variáveis: número de médicos por habitantes, proporção da produção destinada à comercialização e a proporção de pastagens degradadas. Isso significa que para o município de Jequié esses são fatores importante e que apresentam melhor desempenho, enquanto as demais variáveis obtiveram pesos mínimos. Isso indica que esses fatores representam os melhores desempenhos do município, com as demais variáveis recebendo pesos mínimos.

Gráfico 7: Contribuição dos indicadores para o índice de desenvolvimento rural sustentável do município de Jequié



Fonte: Resultados da pesquisa.

A análise dos pesos atribuídos às variáveis no modelo DEA-BOD de distância direcional é importante porque permite reconhecer os pontos fortes e fracos dos municípios e as caraterísticas de melhor desempenho, além de identificar quais variáveis tiveram maior influência na composição do índice composto. Com isso, torna-se possível mapear os aspectos que precisam ser aprimorados.

Os *peers* permite identificar exemplos de boas práticas que poderiam ser aplicadas para melhorar o desempenho dos municípios ineficientes. Assim, ao observar em quais indicadores os municípios pares se destacam, é possível identificar o que pode ser melhorado nos municípios ineficientes. Em outras palavras, o modelo ajuda a identificar quem o município deveria "imitar" para se tornar mais eficiente.

4.3. Análise comparativa dos índices compostos calculados

Estimados os índices de sustentabilidade para os municípios do semiárido baiano, o passo seguinte foi verificar se os índices gerados classificam a sustentabilidade rural de forma

semelhante. Para tanto, os testes estatísticos não paramétricos Spearman e Kendall, foram utilizados para avaliar a relação entre os *rankings* do modelo PCA e dos modelos DEA-BOD de distância direcional. Esses coeficientes avaliam se as posições nos *rankings* são independentes ou estão diretamente relacionadas e, com isso, é possível verificar se ambos os métodos classificam os municípios de forma semelhante.

A tabela 11 apresenta as estatísticas descritivas dos três índices calculados, isto é, IDS-PCA, DEA-BOD sem restrição e DEA-BOD com restrição para os 287 municípios do semiárido baiano. Nela são descritos os valores da média, desvio padrão e o intervalo da distribuição, caracterizado pela diferença entre os valores máximos e mínimos. A média do IDS-PCA foi baixa. A média do modelo DEA-BOD de distância direcional sem restrição foi de 0,954, indicando que, em média, os municípios da região do semiárido baiano estão operando a cerca de 95,4% em relação aos municípios de melhor desempenho.

Tabela 11: Estatísticas descritivas dos índices compostos de sustentabilidade dos estabelecimentos rurais dos municípios do semiárido baiano

	Índice
IDS-PCA	
Média	0,156
Desvio-padrão	0,117
Mínimo	0
Máximo	1
DEA-BOD sem restrição	
Média	0,954
Desvio-padrão	0,059
Mínimo	0,757
Máximo	1
DEA-BOD com restrição	
Média	0,788
Desvio-padrão	0,130
Mínimo	0,541
Máximo	1

Fonte: Resultados da pesquisa.

No modelo DEA-BOD de distância direcional com restrição de pesos a média foi de 0,788, indicando que, em média, os municípios estão operando a 78,8% do nível dos municípios de melhor desempenho. Esse resultado reflete o impacto das restrições de peso, que buscam uma avaliação mais equilibrada e justa, considerando todos os indicadores de maneira igualitária, melhorando a discriminação entre os municípios. A diferença entre o valor mínimo

(0,541) e o máximo (1) é maior, com alguns municípios apresentando um desempenho consideravelmente fraco, próximo a 0,541. Esse valor mínimo mais baixo destaca que há municípios que ainda enfrentam dificuldades expressivas em termos de sustentabilidade. Em suma, os resultados dos três modelos evidenciam uma grande disparidade no desempenho dos municípios e apontam para a necessidade de esforços contínuos para melhorar a sustentabilidade na região do semiárido baiano.

A tabela 12 apresenta os coeficientes de correlação de Spearman entre os *rankings* dos índices IDS-PCA e DEA-BOD de distância direcional, com e sem restrição de pesos. As correlações entre o índice IDS-PCA e os modelos DEA-BOD de distância direcional são moderadas (superiores a 0,60), positivas e significativas ao nível de 1%, indicando associação positiva entre os *rankings*. Isso significa que municípios com bom desempenho no índice IDS-PCA tendem, em grande parte, a apresentar bom desempenho nos modelos DEA-BOD de distância direcional com e sem restrição de pesos.

Apesar de ter uma correlação moderada, as posições nos *rankings* dos dois métodos mostram-se parcialmente consistentes. Essa consistência parcial se justifica pela natureza distinta dos métodos, como demonstrado nas seções 3.4.2 a 3.4.4. O modelo PCA combina variáveis em componentes principais baseados na variância e covariância dos dados, enquanto o modelo DEA-BOD de distância direcional determina os pesos de importância relativa de forma endógena, com base nas características das unidades de melhor desempenho, posicionando cada município em relação a uma fronteira de eficiência.

Tabela 12: Correlação de Spearman

	IDS-PCA	**DEA-BOD Sem restrição**	**DEA-BOD Com restrição**
IDS-PCA	1	0,622**	0,617**
DEA-BOD Sem restrição	0,622	1	0,741
DEA-BOD Com restrição	0,617	0,741**	1

(*) nível de significância $p < 0.05$, (**) nível de significância $p < 0.01$.

Na Tabela 13 são apresentados os coeficientes de correlação de Kendall entre os *rankings* do índice IDS-PCA e dos modelos DEA-BOD de distância direcional, com e sem restrição de pesos. Como esperado, os coeficientes de Kendall são inferiores aos de Spearman (Tabela 11), uma vez que o método de Kendall é mais conservador e menos sensível a grandes variações nos dados.

Os resultados mostram uma correlação moderada e estatisticamente significativa ao nível de 1%, tanto entre o IDS-PCA e os modelos DEA-BOD (0,461 e 0,436). Para os modelos DEA-BOD de distância direcional com e sem restrição de pesos o coeficiente foi um pouco melhor e significativo mostrando que existe uma associação consistente entre os *rankings* produzidos pelos dois métodos, reforçando o padrão já observado pelos coeficientes de Spearman.

Tabela 13: Correlação de Kendall

	IDS	**DEA-BOD_sem_restrição**	**DEA-BOD_com_restrição**
IDS	1	0,461**	0,436**
DEA-BOD_sem_restrição	0,461	1	0,575
DEA-BOD_com_restrição	0,436	0,575**	1

(*) nível de significância $p < 0.05$, (**) nível de significância $p < 0.01$.

Portanto, com base nos resultados dos coeficientes, pode-se concluir que os índices calculados estão correlacionados positivamente. Ou seja, municípios que apresentam bom desempenho em um índice tendem a ter bom desempenho no outro.

4.4. Análise dos efeitos de fatores exógenos no índice de sustentabilidade

Uma vez obtidos os índices de sustentabilidade rural para os municípios do semiárido baiano e verificadas as correlações entre eles, procedeu-se à análise da influência de fatores exógenos sobre os indicadores estimados (etapas 8 e 9 do manual da OCDE). Para tanto, inicialmente foi estimado um modelo linear sem censura por meio do método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), com o objetivo de identificar associações lineares entre as variáveis explicativas e os índices calculados.

Na sequência, considerando a natureza limitada dos escores de sustentabilidade, que variam entre 0 e 1, estimou-se um modelo linear com censura, do tipo Tobit, que o modelo mais adequado para variáveis censuradas. Ambos os modelos foram estimados conjuntamente neste estudo com o propósito de avaliar a robustez dos coeficientes, a estabilidade dos parâmetros e a consistência dos resultados, contribuindo para maior confiabilidade das análises dos determinantes da sustentabilidade rural.

As variáveis exógenas selecionadas para o segundo estágio refletem aspectos estruturais e econômicos da região do semiárido baiano, além de variáveis como o acesso a recursos de crédito direcionadas ao setor agrícola, que contribuem em alguma medida para o desenvolvimento rural como apontado na seção 2.4.

Foram realizadas 2 regressões MQO e Tobit: uma considerando como variável dependente o índice calculado pelo método PCA e o outro pelo método DEA-BOD de distância direcional com restrição de pesos. As variáveis independentes utilizadas estão descritas no quadro 3 (seção 3.6). Os resultados das regressões são apresentados na Tabela 14. As variáveis explicativas foram especificadas em logaritmos, o que contribui para a obtenção de estimativas consistentes e não viesadas sob a presença de heterocedasticidade. A adequação do modelo foi confirmada pelo teste F robusto, que indicou significância estatística global em ambos os modelos estimados.

A Tabela 14 apresenta os resultados das estimações por MQO para o Índice de Sustentabilidade rural medido pelo modelo PCA (Modelo 1) e para o Índice Sustentabilidade rural medido pelo DEA-BOD (Modelo 2). Observa-se que o crédito rural apresentou coeficiente positivo e estatisticamente significativo nos dois modelos, evidenciando seu papel relevante na melhoria dos níveis de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano. A proporção de acesso à irrigação também apresentou efeito positivo e significativo, sugerindo que projetos de irrigação contribuem para a sustentabilidade agrícola dos municípios do semiárido baiano.

A variável área de lavoura e pastagens apresentou coeficiente negativo e estatisticamente significativo em ambos os modelos, indicando que a expansão dessas áreas está associada a menores níveis de sustentabilidade rural, possivelmente em função da pressão ambiental e o uso intensivo do solo exercida pela atividade agropecuária. A área média dos estabelecimentos e a razão de jovens mostrou efeito positivo e significativo apenas no Modelo 1.

Tabela 14: Resultados do modelo de regressão MQO

Variável	**Coeficientes**	
	Modelo MQO – IDS Modelo (1)	**Modelo MQO – CI Modelo (2)**
Intercepto	-0,4819**	0,7459***
Ln_Crédito_total	0,0631***	0,0463***
Ln_Prop_acesso_recursos_crédito	0,0025	0,0076
Ln_Orientação_tecnica	-0,0025	-0,0071
Ln_Proporção_irrigação	0,0183**	0,0303***

Ln_Área_média	0,0366**	0,0173
Ln_Área_lavoura_pastagem	-0,0500**	-0,0758***
Ln_Razão_jovens	0,0114*	-0,0063
Número de observações	287	287
Observações censuradas	2	25
Observações não censuradas	285	67
***p-valor* teste F**	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa, 2025.

O coeficiente negativo e altamente significativo associado à área de lavoura e pastagens evidencia que o crescimento agrícola extensivo em área constitui o principal fator de deterioração da sustentabilidade na região do semiárido. Esse resultado indica que a expansão da fronteira agrícola, baseada predominantemente no aumento da área utilizada, intensifica pressões ambientais, como degradação do solo, escassez hídrica e perda de cobertura vegetal, comprometendo o desempenho sustentável dos sistemas produtivos locais. Dessa forma, os achados reforçam a necessidade de modelos analíticos capazes de incorporar e mensurar as externalidades negativas do processo produtivo, superando abordagens que consideram apenas o desempenho econômico e produtivo. Ao captar simultaneamente resultados desejáveis e indesejáveis, tais modelos mostram-se mais adequados para avaliar a sustentabilidade em contextos ambientalmente frágeis, como o semiárido brasileiro.

Já a variável proporção de irrigação e proporção de área de lavoura e pastagens tem um efeito maior sobre o índice de sustentabilidade rural. A proporção de áreas irrigadas aumenta o índice (0,0313), enquanto a proporção de áreas de lavouras e pastagens reduz o índice (-0,0824).

Na tabela 15 são apresentados os resultados do modelo Tobit. Em relação ao ajuste do modelo, o teste Wald, que avalia a validade do modelo, indica que, em ambos os casos estimados, há pelo menos um coeficiente estatisticamente diferente de zero ao nível de significância de 1%. Isso confirma a validade global dos modelos. E ao atestar que o modelo é globalmente válido, confirma-se o que os coeficientes estimados apresentam, em conjunto, ajustamento satisfatório.

Tabela 15: Resultados do modelo de regressão Tobit

Variável	**Coeficientes**	
	Modelo PCA – IDS Modelo (1)	**Modelo DEA-BOD – CI Modelo (2)**
Intercepto	-0,4179***	0,8023***
Ln_Crédito_total	0,0620***	0,0513***
Ln_Prop_acesso_recursos_crédito	0,0048	0,0083
Ln_Orientação_tecnica	-0,0026	-0,0064

Ln_Proporção_irrigação	0,0170**	0,0330***
Ln_Área_média	0,0410***	0,0209
Ln_Área_lavoura_pastagem	-0,0522***	-0,0868***
Ln_Razão_jovens	0,0243**	0,0032
LogSigma	-2,3581***	-2,0710***
Número de observações	287	287
Observações censuradas	2	25
Observações não censuradas	285	67
Log-likelihood	262,45	141,39
Wald-statistic		
Erro padrão		

Fonte: Resultados da pesquisa, 2025.

Significância: 0 “***”; 0,001 “**”; 0,01 “*”; 0,05 “.”; 0,1 “ ”.

No modelo 1, observa-se que das sete variáveis explicativas, proporção de acesso a recursos de crédito e proporção de orientação técnica não apresentaram coeficientes estatisticamente significativos. Deste modo, não é possível avaliar isoladamente os efeitos dessas variáveis sobre o índice de sustentabilidade rural.

As variáveis com coeficientes estatisticamente significativos para explicar o índice de sustentabilidade rural foram: crédito total, proporção de estabelecimento com acesso a irrigação, área média dos estabelecimentos, a proporção de área de lavoura e pastagem dos estabelecimentos e a razão de jovens. A variável crédito total apresentou coeficiente positivo (0,0620), indicando que o aumento do volume de crédito rural está associado a maior sustentabilidade dos estabelecimentos agropecuários dos municípios do semiárido baiano.

Como apresentado na seção 2.4, estudos anteriores como os de Hunjra *et al*. (2022), Carrer *et al.* (2020) e Ali, Deininger e Duponche (2014) mostravam efeito positivo e significativo da política de crédito rural sobre a sustentabilidade. De acordo com Hunjra *et al*. (2022), o recurso financeiro viabiliza a transição para um modelo de produção sustentável, pois tendo acesso ao crédito os agricultores poderiam adotar tecnologias avançadas e, assim, lidar de forma mais eficaz com os desafios da sustentabilidade. Para Carrer *et al.* (2020) o efeito positivo e significativo do crédito rural sobre a adoção do sistema de integração Lavoura-Pecuária, que proporciona uso mais eficiente e sustentável do solo, revela a importância da política de crédito rural no Brasil e a sua contribuição para acelerar a difusão de sistemas agrícolas sustentáveis.

Da mesma forma, as variáveis proporção de estabelecimento com acesso a irrigação, área média dos estabelecimentos e a razão de jovens também apresentaram coeficientes

positivos e significativos, sugerindo que a maior proporção de acesso a sistemas de irrigação, maior proporção de área média e maior razão de jovens no campo contribuem positivamente para a sustentabilidade rural. Ou seja, o crescimento dessas variáveis está associado a um maior índice.

Uma proporção pequena de estabelecimentos agropecuário tem sistema de irrigação em razão do seu custo, entretanto para o semiárido contribui para o aumento da produção e sustentabilidade. Os municípios com predominância de estabelecimentos agropecuários com área média maiores se mostraram mais sustentáveis, provavelmente em razão de a pequenas propriedades tenderem a utilizar de forma exaustiva os recursos naturais. A população jovem tem mais capacidade laboral o que pode contribuir mais decisivamente com o aumento da sustentabilidade.

Já a variável proporção de área de lavoura e pastagem apresentou coeficiente negativo (-0,0522), mostrando uma relação negativa da área de lavoura e pastagens com o índice de sustentabilidade rural, sugerindo que a expansão de áreas para cultivo e pastagens está associada à redução da sustentabilidade rural. Esse resultado indica que a sustentabilidade tende a aumentar quando se prioriza o uso eficiente de áreas já abertas, ao invés da abertura de novas áreas, favorecendo a preservação ambiental e o ganho de produtividade.

No modelo 2, os sinais dos coeficientes se mantiveram, apesar das variáveis área média e razão jovens não serem significativas. Considerando o modelo 2 o índice de sustentabilidade agrícola está associado positivamente a oferta de crédito rural e o acesso a projetos de irrigação, de modo que o aumento dessas variáveis eleva o índice de sustentabilidade agrícola. Sendo essas variáveis dois fatores muito importante para a análise de sustentabilidade rural para os municípios do semiárido baiano, pois elas foram significativas em ambos os modelos, com efeito positivo sobre o índice calculado, reforçando a importância da política de crédito rural para a adoção de práticas sustentáveis, bem como a importância dos projetos de irrigação para a região.

Além dos coeficientes foi estimando os efeitos marginais que mostram a variação esperada no índice para cada aumento percentual das variáveis explicativas. Como apresentado na tabela 15, um aumento de 1% no crédito total está associado a um aumento de aproximadamente 0,0589 pontos no IDS_PCA. Para a variável proporção de irrigação um aumento de 1% na proporção de áreas irrigadas eleva o índice de sustentabilidade em 0,0162 pontos percentuais.

Esses resultados corroboram com o estudo de Silva, Justos e Cavalcante (2022) que identificam que a variável irrigação e acesso a financiamento tem uma relação positiva com a eficiência de escala dos estabelecimentos agropecuários das 35 regiões intermediárias nordestinas para o ano de 2017. Como apontado por esses autores, a prática de irrigação pode contribuir para aumentar a eficiência no uso da terra, uma vez que, com a irrigação é possível obter a mesma produção em uma área menor. Além disso, é uma alternativa para enfrentar as adversidades climáticas e conseguir estabilizar a produção, possibilitando um maior acúmulo de carbono às terras agrícolas, dado pelos resíduos de matéria orgânica acumuladas no solo, tornando-o mais fértil.

A variável área média e razão de jovens também tem efeito positivo, deste modo, um aumento de 1% nesses fatores está associado a um incremento no índice de sustentabilidade. Enquanto a área de lavoura e pastagem reduz o índice de sustentabilidade em -0,0496 pontos percentuais.

Tabela 16: Efeitos marginais do modelo de regressão Tobit

Variável	**Efeito Marginal**	
	Modelo PCA – IDS Modelo (1)	**Modelo DEA-BOD – CI Modelo (2)**
Ln_Crédito_total	0,0589***	0,0487***
Ln_Prop_acesso_recursos_crédito	0,0046	0,0078
Ln_Orientação_tecnica	-0,0025	-0,0061
Ln_Proporção_irrigação	0,0162**	0,0313***
Ln_Área_média	0,0389***	0,0198
Ln_Área_lavoura_pastagem	-0,0496***	-0,0824***
Ln_Razão_jovens	0,0231**	0,0030

Fonte: Resultados da pesquisa, 2025.
Significância: 0 “***”; 0,001 “**”; 0,01 “*”; 0,05 “.”; 0,1 “ ”.

Analisando o efeito marginal dos fatores exógenos sobre o índice calculado pelo modelo DEA-BOD de distância direcional com restrição de pesos, os resultados são um pouco diferentes. As variáveis área média dos estabelecimentos e razão de jovens não foram significativas. A variável crédito total teve um efeito menor (0,0487) do que modelo 1, mas significativo e positivo como esperado. Indicando que o índice de sustentabilidade agrícola dos municípios do semiárido baiano aumenta com o aumento da disponibilidade de crédito rural.

O efeito marginal do crédito rural foi numericamente inferior no modelo DEA-BOD de distância direcional em virtude do rigor no tratamento dos fatores indesejáveis no modelo EA-BOD de distância direcional, reduzindo o impacto aparente da política de crédito rural.

Embora o modelo Tobit seja amplamente empregado em estudos DEA-BOD em dois estágios, a literatura aponta algumas críticas em relação ao seu uso no segundo estágio. Com o objetivo de verificar a robustez dos resultados e mitigar possíveis questionamentos quanto à adequação do modelo Tobit, adotou-se, de forma alternativa, o modelo de regressão por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) com erros-padrão robustos à heterocedasticidade.

Os modelos mostram que fatores exógenos como crédito, área média dos estabelecimentos, proporção de área irrigada e razão de jovens são fatores importantes para a sustentabilidade rural dos municípios do semiárido brasileiro, e que as áreas de lavoura e pastagens reduz a sustentabilidade. Esses resultados reforçam a importância de políticas públicas de incentivo ao crédito rural, a expansão das áreas irrigadas e o incentivo a participação de jovens no meio rural, ao mesmo tempo em que chama a atenção para os impactos negativos da abertura de novas áreas sobre a sustentabilidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sustentabilidade, vista como um grande desafio da humanidade no século XXI, tem como missão promover o crescimento econômico com o menor impacto ambiental possível, garantindo que as gerações futuras também tenham acesso aos mesmos recursos. O que não é uma tarefa fácil, pois a sustentabilidade é um processo contínuo, complexo e multidimensional. Os índices compostos são ferramentas essenciais para avaliar os níveis de desenvolvimento e, sobretudo, de sustentabilidade. Com eles, é possível identificar não apenas o nível atual de sustentabilidade, mas também os pontos que precisam ser melhorados e as boas práticas que poderiam ser replicadas em outros locais, oferecendo um importante subsídio para a formulação de políticas públicas.

Dessa forma, dada a importância mundial de promover a sustentabilidade, que também envolve ações de boas práticas na atividade rural, este estudo se propôs a avaliar o nível de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano e identificar se a política de crédito rural está ou não associada à sustentabilidade. Ou seja, buscou-se verificar se o crédito rural exerce efeito positivo sobre o nível de sustentabilidade.

Para isso, utilizou-se um procedimento em dois estágios: o primeiro consistiu na avaliação do índice de sustentabilidade rural por meio de dois métodos de ponderação (modelo PCA e o modelo DEA-BOD de distância direcional); o segundo estágio consistiu na análise da influência de fatores exógenos, como o crédito rural, sobre o índice de sustentabilidade, para isso aplicou-se o modelo de regressão Tobit. Nesse caso, buscou-se identificar se cada um dos fatores exógenos selecionados está ou não associado a um maior ou menor índice de sustentabilidade rural.

Como o índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano foram calculados por dois métodos diferentes, podem-se extrair três conclusões principais deste estudo: a primeira, diz respeito a aplicabilidade dos métodos de ponderação de índices compostos propostos; a segunda diz respeito aos resultados dos índices e a disposição geográfica dos resultados; e a terceira diz respeito a análise dos efeitos dos fatores exógenos no segundo estágio.

A aplicação de dois métodos de ponderação no primeiro estágio, possibilitou uma visão mais abrangente da sustentabilidade rural gerando resultados mais robustos. Os dois métodos de ponderação - PCA e DEA-BOD - de ponderação permitiram avaliar a sustentabilidade a

partir de diferentes perspectivas. Pela ótica do modelo PCA, a sustentabilidade é avaliada a partir das correlações entre as variáveis, permitindo a redução da dimensionalidade a poucos componentes que explicam a maior parte da variância dos dados. No entanto, não havendo forte correlação entre as variáveis, o modelo PCA perde eficácia, e não consegue atingir o seu objetivo de reduzir a dimensionalidade em poucos componentes. Podendo minimizar a contribuição de variáveis importantes por não apresentarem correlação com as outras variáveis. Ou até mesmo agrupar em um único componente variáveis que não apresentam correlação no mundo real, dificultando a interpretação dos resultados. Portanto, em avalições de sustentabilidade este método não seria o mais apropriado, por essas características.

O modelo DEA-BOD de distância direcional com restrição de pesos não depende da correlação entre as variáveis, todos os indicadores recebem um peso mínimo na avaliação do desempenho. Assim, nenhum indicador que foi selecionado como importante para a construção do índice se perde e todos são considerados no modelo, diferentemente do que ocorre na PCA. Nesse caso, os pesos de importância relativa são definidos endogenamente pelo modelo.

Dessa forma, a abordagem DEA-BOD de distância direcional mostra-se particularmente adequada para determinar níveis relativos de sustentabilidade. Primeiramente, porque ela consegue lidar com diferentes tipos de dados (monetários e físicos) sem a necessidade de normalização prévia, o que é importante dado o caráter multidimensional da sustentabilidade, que envolve tanto indicadores monetários, como o valor da produção, quanto indicadores sociais e ambientais expressos em diferentes escalas de medidas (toneladas, hectares). Segundo, porque não exige informações prévias sobre os pesos das variáveis, estes são definidos endogenamente e obtidos por meio da resolução de programas de otimização linear. Além disso, esse método tem a vantagem de definir pesos ótimos às características de melhor desempenho, evitando que algumas unidades se sintam prejudicas ao serem comparadas com outras unidades a partir de esquemas fixo e comuns de ponderação.

Outro aspecto importante com relação ao uso do modelo BOD formulado a partir da função DDF é que variáveis consideradas importantes não são eliminadas, como pode ocorrer no modelo PCA. Na PCA os pesos são baseados nas correlações entre os indicadores, e se não existe correlação forte uma dimensão importante pode receber um peso pequeno simplesmente porque não estar fortemente correlacionada com outras dimensões, sendo ignorada no modelo. No modelo DEA com restrições de pesos isso não acontece, ele é formulado de modo a incorporar todas as variáveis, reconhecendo sua relevância independentemente de correlações.

Por outro lado, na PCA atribuem-se as maiores cargas fatoriais aos indicadores individuais que apresentam maior variação entre os municípios, facilitando as comparações entre elas.

Os resultados obtidos a partir do modelo PCA mostram um baixo nível de sustentabilidade rural nos municípios do semiárido baiano, com índice médio de 0,15. No modelo PCA foi possível ranquear perfeitamente todos os municípios, não houve empates, entre os municípios mais bem classificados destacam-se: Formosa do Rio Preto, São Desidério, Mucugê, Barreiras e Ibicoara. Dentre eles, Formosa do Rio Preto, São Desidério e Barreiras que se destacam como importantes produtores agrícolas do estado da Bahia, voltados à produção em larga escala, especialmente de grãos. Observou-se ainda que os municípios com melhor índice de sustentabilidade se concentram na região Extremo Oeste Baiano, e os com menor índice localizam-se no interior do estado, em geral os municípios com baixo índice de sustentabilidade são municípios de pequeno porte e baseados na produção familiar de pequena escala.

Já os resultados do modelo DEA-BOD de distância direcional mostram que os municípios do semiárido baiano apresentam um desempenho médio, a média da região foi de 0,78. Nesse modelo, observou-se um número maior de municípios com médio e alto desempenho em termos de sustentabilidade, principalmente na faixa central do estado, formando um corredor até o município de Juazeiro, ao norte. Nessa região concentra-se importantes projetos de irrigação e a produção de frutas. No *ranking* geral desse modelo, 29 municípios aparecem em primeiro lugar com maior nível de sustentabilidade, que são os chamados *benchmarking,* ou seja, as unidades de melhores práticas. E aqui destaca-se uma limitação dos modelos DEA, que é justamente a dificuldade de discriminação entre as unidades de melhores práticas. Neste caso, seria necessário incluir outros modelos, como o de supereficiência, para conseguir discriminar as DMU's de melhores práticas. Ficando como sugestão para estudos futuros a inclusão do modelo de supereficiência.

Os resultados obtidos pelos dois métodos apresentaram correlações moderadas, positivas e estatisticamente significativas ao nível de 1%, indicando a existência de associação positiva entre os rankings gerados por ambos os modelos. Esse achado sugere convergência parcial entre as abordagens metodológicas adotadas, evidenciando que municípios com melhor desempenho no índice IDS-PCA tendem, em grande medida, a apresentar desempenho igualmente superior nos modelos DEA-BOD com função de distância direcional, tanto na especificação com restrição de pesos quanto na versão sem restrição. Tal evidência reforça a

consistência dos resultados e aponta para estabilidade relativa na hierarquização dos municípios, independentemente da técnica de mensuração empregada.

No que se refere à avaliação dos efeitos de fatores exógenos sob o índice de sustentabilidade, os resultados obtidos a partir do modelo de regressão Tobit 1 e 2 confirmam a suposição inicial deste estudo de que o crédito rural é uma variável importante e tem efeito positivo sobre o nível de sustentabilidade, como apontado em estudos anteriores. Além disso, as variáveis proporção de áreas irrigadas e áreas de lavouras e pastagens também apresentaram efeitos significativos sob o nível de sustentabilidade. A proporção de áreas irrigadas tem relação positiva com a sustentabilidade, enquanto o total de áreas de lavouras e pastagens tem relação negativa, ou seja, reduz a sustentabilidade. O que já era esperado, uma vez que a abertura de áreas de lavouras e pastagens implica em redução de áreas de mata e vegetação nativa, que tem uma relação inversa com a sustentabilidade.

A análise conjunta dos dois métodos ampliou a compreensão sobre a realidade dos municípios do semiárido baiano e evidenciou que, embora os índices possam variar conforme a técnica empregada, ambos apontam para diferenças territoriais significativas, indicando a necessidade de políticas diferenciadas e adaptadas às especificidades de cada município.

Concluímos que o crédito rural tem um efeito positivo e altamente significativo sobre o nível de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano, corroborando com os estudos anteriores que já vem mostrando esse efeito positivo da política de crédito rural enquanto determinante da sustentabilidade. Validando a política de crédito rural como um instrumento eficiente na promoção de um setor agrícola mais sustentável. O acesso ao crédito rural nas regiões mais remotas é fundamental para fomentar a produção agropecuária com aplicação de insumos e práticas agrícolas mais sustentáveis para essas áreas com ambiente mais severos. A escassez de crédito está associada à baixa cobertura de serviços de assistência técnica e extensão rural aos produtores do semiárido baiano, o que limita tanto a capacidade de investimento quanto a adoção de inovações produtivas sustentáveis.

Nesse sentido, para ampliar a acessibilidade ao crédito, é necessário fortalecer e expandir as políticas públicas voltadas ao financiamento rural na região, articulando-as com ações de assistência técnica e capacitação. Tal estratégia pode impulsionar o desempenho dos municípios em termos de sustentabilidade, contribuindo para maior resiliência produtiva, inclusão econômica e desenvolvimento rural sustentável no semiárido baiano.

Para estudos futuros, sugere-se a expansão dos indicadores utilizados no cálculo do índice, incorporando fatores mais dinâmicos como as mudanças tecnológicas e fatores relacionados ao ambiente institucional, o que permitiria uma compreensão mais aprofundada sobre a dinâmica regional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, I.; NUNES, J. M.; MESIAS, F. J. Can rural development be measured? Design and application of a synthetic index to Portuguese municipalities. **Social Indicators Research**, [s. l.], v. 145, p. 1107-1123, 2019. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-019-02124-w. Acesso em: 18 out. 2023.

ABDAR, Z. K.; AMIRTAIMOORI, S.; ZARE MEHRJERDI, M. R.; MEHRABI BOSHRABADI, H. A composite index for assessment of agricultural sustainability: the case of Iran. **Environmental Science and Pollution Research,** v. 29, p. 47337-47349, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-19154-6. Acesso em: 7 jul. 2025.

AGOVINO, M. et al. Agriculture, climate change and sustainability: the case of EU-28. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 105, p. 525-543, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X18303170. Acesso em: 7 jan. 2025.

ALI, D. A.; DEININGER, K.; DUPONCHEL, M. Credit Constraints and Agricultural Productivity: Evidence from rural Rwanda. **The Journal of Development Studies**, [s. l.], v. 50, n. 5, p. 649–665, 2014. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00220388.2014.887687. Acesso em: 12 ago. 2024.

AMARAL, F. J. G.; BACHA, C. J. C. Evolução do crédito rural no Brasil de 1969 a 2023. **Revista Economia Contemporânea**, [s. l.], v. 29, p.1-30, 2025. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rec/a/35gWKXh64Mg9KxGhBf4Ttmf/?format=html&lang=pt. Acesso em: 12 jan. 2026.

APARICIO, J.; KAPELKO, M. M.; MONGE, J. F. A. Well-Defined Composite Indicator: An Application to Corporate Social Responsibility. **Journal of Optimization Theory and Applications**, [S. l.], v. 186, p. 299–323, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10957-020-01701-1. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10957-020-01701-1#citeas. Acesso em: 7 out. 2023.

ASSUNÇÃO, J.; FERNANDES, P.; SOUZA, P.; MIKIO, S. Does Credit Boost Agriculture? Impacts on Brazilian Rural Economy and Deforestation. **CPI/PUC-Rio**, Toulouse School of Economics, Brazilian Central Bank. Disponível em: https://www.oicrf.org/documents/40950/0/02-10-Zeraik_de_Souza-869_paper.pdf/dfbce8af-ad83-6fae-1a94-05f1661927f2?t=1646308419198. Acesso em: 21 out. 2023.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Matriz de dados de crédito rural. 2022**. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/micrrural. Acesso em: 1 out. 2023.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies. **Management Science**, [S. l.], v. 30, n. 9, p. 1078–1092, 1984. DOI: https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078. Disponível em: https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.30.9.1078. Acesso em: 29 out. 2023.

BATHAEI, A.; ŠTREIMIKIENĖ, D. A systematic review of agricultural sustainability indicators. **Agriculture**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 241, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2077-0472/13/2/241. Acesso em: 17 abr. 2025.

BATUNG, E. S.; MOHAMMED, K.; KANSANGA, M. M.; NYANTAKYI-FRIMPONG, I. L. Credit access and perceived climate change resilience of smallholder farmers in semi arid northern Ghana. Environment, **Development and Sustainability**, [s. l.], v. 25, p. 321–350, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-021-02056-x. Acesso em: 4 abr. 2024.

BELIK, W. O financiamento da agropecuária brasileira no período recente. Brasília: **IPEA**, Texto para Discussão, n. 2028. Disponível em: https://ideas.repec.org/p/ipe/ipetds/2028.html. Acesso em: 12 jan. 2026.

BENAYAD, N.; BAGUARE, A.; ABDOUH, M. Developing a composite indicator for agricultural sustainability assessment in the Fes-Meknes region, Morocco. **Journal of the Knowledge Economy,** [s. l.], v. 15, p. 15723-15744, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13132-023-01721-y. Acesso em: 7 abr. 2025.

BENTO, J. A. do N.; VIEIRA FILHO, J. E. R. O impacto do crédito rural sustentável na emissão de gases do efeito estufa: evidências para sustentabilidade agropecuária brasileira. **Boletim regional, urbano e ambiental,** [s. l.], v. 27, p. 160–162, 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/36f6d290-c1d2-4484-a2c1-2aeb5475850d/content. Acesso em: 12 ago. 2024.

BONNET, J.; COLL-MARTÍNEZ, E.; RENOU-MAISSANT, P. Evaluating sustainable development by composite index: evidence from French departments. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 761, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/761. Acesso em: 7 jan. 2025.

BRAGANÇA, A.; ASSUNÇÃO, J. Caminhos para produção agropecuária sustentável no Brasil: Potenciais ganhos e investimentos necessários para aumentar a produtividade brasileira. **Climate Policy Initiative**, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2019/06/Sumarios-Producao-Agropecuaria-Sustentavel-18Jun19-2.pdf. Acesso em: 15 set. 2023.

BRASIL. **Presidência da República**. Secretaria de Comunicação Social. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/secom/pt-br/acompanhe-a-secom/noticias/2024/11/cop29-compromissos-do-brasil-marcam-avanco-global-na-luta-contra-a-mudanca-do-clima. Acesso em: 15 dez. 2024.

BRUNDTLAND, G. **Our Common Future: The Report of the World Commission on Environment and Development**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

CAIADO, R. G.; HEYMANN, M. C.; SILVEIRA, C. L. R.; MEZA, L. Â.; QUELHAS, O. L. G. Measuring the Eco-efficiency of Brazilian Energy Companies using DEA and Directional Distance Function. **IEEE Latin America Transactions**, [s. l.], v. 18, n. 11, p. 1844–1852, 2020.

Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9398625. Acesso em: 7 jul. 2024.

CALABRIA, F. A.; CAMANHO, A. S.; ZANELLA, A. The use of composite indicators to evaluate the performance of Brazilian hydropower plants. **International Transactions in Operational Research**, [s. l.], v. 25, p. 1323-1343, 2018. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/itor.12277. Acesso em: 7 jul. 2024.

CARRER, M. J.; MAIA, A. G.; VINHOLIS, M. M. B.; FILHO, H. M. S. Assessing the effectiveness of rural credit policy on the adoption of integrated crop-livestock systems in Brazil. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 92, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837718313838. Acesso em: 18 set. 2023.

CARVALHO, N. S. F. de S.; CARDOSO, G. C. de C.; FROTA, A. J. A. A construção do conceito de desenvolvimento sustentável à luz da teoria econômica: trajetória, desafios e perspectivas. **Revista de Economia do Nordeste,** Fortaleza, v. 53, n. 1, p. 156-167, 2022. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/index.php/ren/article/view/1342. Acesso em: 28 jul. 2023.

CEPEA/USP. **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada.** 2022. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/br. Acesso em: 11 jul. 2023.

CHAMBERS, R. G.; CHUNG, Y.; FÄRE, R. Benefit and distance functions. **Journal of Economic Theory,** [s. l.], v. 7, p. 161–173, 1996. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022053196900964. Acesso em: 7 jul. 2025.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 2, n. 6, p. 429-444, 1978. DOI: https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0377221778901388. Acesso em: 14 jul. 2023.

CHEN, N.; XU, L.; CHEN, Z. Environmental efficiency analysis of the Yangtze River Economic Zone using super efficiency data envelopment analysis (SEDEA) and tobit models. **Energy,** [S. l.], v. 134, n. 1, p. 659–671, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217310708. Acesso em: 18 ago. 2024.

CHERCHYE, L.; MOESEN, W.; ROGGE, N.; VAN PUYENBROECK, T. An Introduction to 'Benefit of the Doubt' Composite Indicators. **Social Indicators Research**, [S. l.], v. 82, p. 111–145, 2007. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-006-9029-7#citeas. Acesso em: 17 out. 2023.

CHUNG, Y. H.; FARE, R.; GROSSKOPF, S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 51,

n. 3, p. 229–240, 1997. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479797901468. Acesso em: 11 ago. 2024.

CONTERATO, M. A.; SCHNEIDER, S.; WAQUIL, P. D. Desenvolvimento rural no Estado do Rio Grande do Sul: uma análise multidimensional de suas desigualdades regionais. **REDES,** Santa Cruz do Sul, v. 12, n. 2, p. 163-195, 2007. Disponível em: https://www.ufrgs.br/pgdr/wp-content/uploads/2021/12/408.pdf. Acesso em: 15 out. 2023.

D'INVERNO, G.; WITTE, K. de. Service level provision in municipalities: A flexible directional distance composite indicator. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 286, p. 1129–1141. Disponível em: https://cris.maastrichtuniversity.nl/ws/portalfiles/portal/75667845/Witte_2020_Service_level_provision_in_municipalities.pdf. Acesso em: 21 set. 2024.

DU, K.; LU, H.; YU, K. Sources of the potential CO2 emission reduction in China: a nonparametric metafrontier approach. **Applied Energy,** [s. l.], v. 115, p. 491–501, 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261913008763. Acesso em: 19 jul. 2024.

DYSON, R. G.; ALLEN, R.; CAMANHO, A. S.; PODINOVSKI, V. V.; SARRICO, C. S.; SHALE, E. A. Pitfalls and protocols in DEA. **European Journal of Operational Research**, v. 132, n. 2, p. 245–259, 2001. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221700001491. Acesso em: 11 jul. 2024.

DONG, Y.; MITCHELL, P.; COLQUHOUN, H. Measuring farm sustainability using data envelope analysis with principal components: the case of Wisconsin cranberry. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 147, p. 175-183, 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714004423. Acesso em: 7 fev. 2025.

ELLIS, F.; BIGGS, S. Evolving themes in rural development 1950s-2000s. **Development Policy Review**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 437-448, 2001. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-7679.00143. Acesso em: 29 out. 2023.

FUSCO, E. Potential improvements approach in composite indicators construction: The Multi-directional Benefit of the Doubt model. **Socio-Economic Planning Sciences**, [s. l.], v. 85, p. 101447, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012122002488. Acesso em: 18 out. 2024.

ERVURAL, B. C.; ZAIM, S.; DELEN, D. A two-stage analytical approach to assess sustainable energy efficiency. **Energy**, [s. l.], v. 164, n. 1, p. 822-836, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218317493. Acesso em: 8 out. 2023.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Sustainable agriculture | sustainable development goals | Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2023. Disponível em: https://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-the-2030-agenda-for-sustainable-development/sustainable-agriculture/en/. Acesso em: 7 jul. 2025.

FARRELL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society,** London, v. 120, Part III, p. 253–290, 1957. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/2343100. Acesso em: 21 jul. 2024.

FENG, C.; WANG, M.; LIU, G.-C.; HUANG, J.-B. Green development performance and its influencing factors: a global perspective. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 144, n. 15, p. 323-333, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617300069. Acesso em: 16 maio 2025.

FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, P.; CASTRO-PARDO, M.; BARROSO, V. M.; AZEVEDO, J. C. Assessing sustainable rural development based on ecosystem services vulnerability. **Land**, [s. l.], v. 9, n. 7, 2020. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-445X/9/7/222. Acesso em: 26 set. 2023.

FERNANDEZ, B. P. M. Ecodesenvolvimento, desenvolvimento sustentável e economia ecológica: em que sentido representam alternativas ao paradigma de desenvolvimento tradicional?. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, n. 23, p. 109–120, 2011. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/made/article/viewFile/19246/14460. Acesso em: 9 abr. 2023.

FERREIRA, A. L.; BRANCHI, B. A.; OLIVEIRA, F. C. R. de. Desenvolvimento rural sustentável: uma avaliação das microrregiões brasileiras. Revista Econômica do Nordeste, [S. l.], v. 55, n. 4, p. 8-29, 2024. Disponível em: https://bnb.gov.br/revista/ren/article/view/1570. Acesso em: 7 mai. 2025.

FERREIRA, D. C.; CALDAS, P.; VARELA, M.; MARQUES, R. C. A geometric aggregation of performance indicators considering regulatory constraints: an application to the urban solid waste management. **Expert Systems with Applications**, [S. l.], v. 218, p. 119540, 15 maio 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119540. Acesso em: 7 jul. 2025.

FRIO, G. S.; FOCHEZATTO, A.; TRIACA, L. M.; FINN, E. S.; BRAATZ, J. Eficiência na educação: uma análise por escola no Rio Grande do Sul utilizando o método DEA em dois estágios. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 74–89, 2018. Disponível em: https://www.revistaaber.org.br/rberu/article/view/1180. Acesso em: 7 jul. 2024.

FURTADO, C. **Teoria e política do desenvolvimento econômico**. São Paulo: Nova Cultura, 1986.

FUSCO, E. Potential improvements approach in composite indicators construction: the Multi-directional *Benefit of the Doubt* model. **Socio-Economic Planning Sciences**, [s. l.], v. 85, n. 101447, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012122002488. Acesso em: 7 fev. 2025.

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**, [s. l.], v. 81, p. 491–502, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X17303357. Acesso em: 7 jun. 2025.

GRAZIANO DA SILVA, José; DEL GROSSI, Mauro; CAMPANHOLA, Clayton. O que há de realmente novo no rural brasileiro. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 37–67, 2002. DOI: 10.35977/0104-1096.cct2002.v19.8795. Disponível em: https://apct.sede.embrapa.br/cct/article/view/8795. Acesso em: 23 ago. 2025.

GRECO, S.; ISHIZAKA, A.; TASIOU, M.; TORRISI, G. On the methodological framework of composite indices: a review of the issues of weighting, aggregation, and robustness. **Social Indicators Research**, [s. l.], v. 141, n. 1, p. 61-94, 2019. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-017-1832-9. Acesso em: 7 mai. 2025.

GHELLER, D. G.; GAZOLLA, M.; MARINI, M. J. Políticas públicas de mitigação da emissão de gases de efeito estufa na agricultura: uma análise do programa ABC. **Informe GEPEC**, Toledo, v. 23, n. 1, p. 93–111, 2019. Disponível em: https://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/index. Acesso em: 14 out. 2024.

GRAZIANO DA SILVA, J. **O novo rural brasileiro**. Campinas: Unicamp, 2002.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. *et al*. Embedding environmental, economic and social indicators in the evaluation of the sustainability of the municipalities of Galicia (northwest of Spain). **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 234, p. 27-42, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619321183. Acesso em: 27 jun. 2025.

HAIBO, Z.; YI, Y.; YAO, C.; JOE, Z. Data envelopment analysis application in sustainability: The origins, development and future directions. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 264, n. 1, p. 1-16, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221717305623. Acesso em: 29 out. 2023.

HAIR, J. F. Jr. **Análise multivariada de dados** [recurso eletrônico] / [*et al*.]; tradução Adonai Schlup Sant'Anna. 6. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: Bookman, 2009.

HARYANTO, T.; WADANA, W. W.; JAMIL, I. R.; BRINTANTI, A. R. D.; IBRAHIM, K. H. Impact of credit access on farm performance: Does source of credit matter?. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 9, 2023. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023069281. Acesso em: 10 jun. 2025.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S – Engineering & Science**, [s. l.], v. 5, n. 1, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320646723_Analise_de_Componentes_Principais_Resumo_Teorico_Aplicacao_e_Interpretacao. Acesso em: 7 jul. 2025.

HU, S.; YANG, Y.; ZHENG, H.; MI, C.; MA, T.; SHI, R. A framework for assessing sustainable agriculture and rural development: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. **Environmental Impact Assessment Review**, [s. l.], v. 97, n. 106861, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925522001275. Acesso em: 12 jul. 2023.

HUNJRA, A. I.; AZAM, M.; BRUNA, M. G.; TASKIN, D. Role of financial development for sustainable economic development in low middle income countries. **Finance Research Letters**, [S. l.], v. 47, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1544612322001052. Acesso em: 13 set. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017**. Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal,** 2023. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 mar. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA). 2023. Disponível em: https://www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro#. Acesso em: 20 ago. 2023.

JANKER, J.; MANN, S. Understanding the social dimension of sustainability in agriculture: a critical review of sustainability assessment tools. **Environment, Development and Sustainability**, v. 22, p. 1671-1691, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-018-0282-0#citeas. Acesso em: 17 jul. 2023.

KAGEYAMA, A. **Desenvolvimento Rural: conceitos e aplicações ao caso brasileiro**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2008.

KARAGIANNIS, G. On aggregate composite indicators. **Journal of the Operational Research Society**, [S. l.], v. 68, n. 7, p. 741-746, 2017. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1057/jors.2015.81. Acesso em: 15 out. 2023.

KÜHN, D. D. Desenvolvimento rural: afinal, sobre o que estamos falando. **Redes (St. Cruz Sul, Online)**, Santa Cruz do Sul, v. 20, n. 2, p. 11-30, 2015. Disponível em: https://online.unisc.br/seer/index.php/redes. Acesso em: 19 jul. 2023.

KWATRA, S.; KUMAR, S.; SHARMA, R. A critical review of studies related to construction and computation of Sustainable Development Indices. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 112, n.

106061, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X1931057X. Acesso em: 7 abr. 2024.

LAMPRIDI, M. G.; SØRENSEN, C. G.; BOCHTIS, D. Agricultural Sustainability: A Review of Concepts and Methods. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n.18, p. 5120. 2019. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/11/18/5120. Acesso em: 25 jan. 2026.

LAVIGNE, C.; JAEGER, S. D.; ROGGE, N. Identifying the most relevant peers for benchmarking waste management performance: A conditional directional distance Benefit-of-the-Doubt approach. **Waste Management**, [s. l.], v. 89, p. 418–429, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19302193. Acesso em: 25 jun. 2024.

LAZARETTI, L. R.; BATISTELLA, P.; TEIXEIRA, F. O.; FREITAS, T. D.; FREITAS, C. A. de. Modernização e desenvolvimento rural nos municípios gaúchos. **Revista de Política Agrícola**, [s. l.], v. XXVIII, n. 2, p. 225–236, 2019. Disponível em: https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/1369/pdf. Acesso em: 21 set. 2023.

LIBÓRIO, M. P.; MARTINUCI, O. S.; MACHADO, A. M. C.; EKEL, P. I.; ABREU, J. F.; LAUDARES, S. Representing multidimensional phenomena of geographic interest: Benefit of the Doubt or Principal Component Analysis?. **The Professional Geographer**, [s. l.], v. 74, n. 4, p. 758–771, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00330124.2022.2048868. Acesso em: 7 jul. 2025.

LOBÃO, M. S.; PEDROZA, J.; STADUTO, J. A. R. Perspectivas sobre o desenvolvimento rural brasileiro: notas teóricas. **Revista Paranaense de Desenvolvimento - RPD**, [s. l.], v. 39, n. 135, p. 13-27, 2018. Disponível em: https://ipardes.emnuvens.com.br/revistaparanaense/article/view/964. Acesso em: 8 set. 2023.

LÓPEZ-PENABAD, M. C.; IGLESIAS-CASAL, A.; REY-ARES, L. Proposal for a sustainable development index for rural municipalities. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 357, n. 131876, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262201486X. Acesso em: 18 set. 2023.

LOPES, D.; LOWERY, S.; PEROBA, T. L. C. Crédito rural no Brasil: desafios e oportunidades para a promoção da agropecuária sustentável. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 45, 2016. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9518. Acesso em: 3 out. 2023.

MAGRINI, A.; GIAMBONA, F. A composite indicator to assess sustainability of agriculture in European Union countries. **Social Indicators Research,** [S. l.], v. 163, p. 1003-1036, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-022-02925-6. Acesso em: 8 mai. 2025.

MACHADO, B. S. *et al*. Access and impact of Pronaf in Brazil: evidence on typologies and regional concentration. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 62, n. 3,

e273994, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/resr/a/DQDX8hz6pypjmyfpWwSs8Ck/?format=html&lang=en. Acesso em: 8 jan. 2026.

MAPBIOMAS. **Uso e cobertura do solo do Brasil - série 1985–2021**. Coleção 7.0, 2021. Disponível em: Plataforma - MapBiomas Brasil. Acesso em: 21 jun. 2024.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012–15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **INPE**, 2016. Disponível em: http://climanalise.cptec.inpe.br/%7Erclimanl/revista/pdf/30anos/marengoetal.pdf. Acesso em: 10 jul. 2023.

MARIANO, E. B.; FERRAZ, D.; GOBBO, S. C. O. The Human Development Index with Multiple Data Envelopment Analysis approaches: a comparative evaluation using Social Network Analysis. **Social Indicators Research**, [s. l.], v. 157, p. 443-500, 2021. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-021-02660-4. Acesso em: 7 jun. 2024.

MARICIC, M.; JEREMIC, V. Imposing unsupervised constraints to the Benefit-of-the-Doubt (BoD) model. **METRON,** [s. l.], v. 81, p. 259–296, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s40300-023-00254-3. Acesso em: 18 mai. 2025.

MAYER, H.; HABERSETZER, A.; MEILI, R. Rural–Urban Linkages and Sustainable Regional Development: The Role of Entrepreneurs in Linking Peripheries and Centers. **Sustainability**, [s. l.], v. 8, n. 8, p. 745, 2016. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/8/8/745. Acesso em: 19 mai. 2024.

MAZZIOTTA, M.; PARETO, A. Use and misuse of PCA for measuring well-being. **Social Indicators Research,** [s. l.], v. 142, p. 451–476, 2018. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-018-1933-0. Acesso em: 7 fev. 2025.

MEJÍA, D.; DÍAZ, M. F.; ENCISO, K.; BURKART, S. What is the relationship between agricultural credit, cattle, and deforestation? A spatial analysis in Colombia. **Policy Brief**, Cali, n. 61, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356267591_What_is_the_relationship_between_agricultural_credit_cattle_and_deforestation_A_spatial_analysis_in_Colombia. Acesso em: 18 mai. 2025.

MEJÍA TEJADA, D.; DÍAZ BACA, M. F.; ENCISO VALENCIA, K. J.; PARRA, A. M. B.; FLÓREZ, J. F.; PAREDES, J. J. J.; BURKART, S. The impact of agricultural credit on the cattle inventory and deforestation in Colombia: a spatial analysis. **NPJ Climate Action**, v. 3, n. 34, 2024. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s44168-024-00107-3#citeas. Acesso em: 21 nov. 2023.

MELO, C. O.; PARRÉ, J. L. Índice de desenvolvimento rural dos municípios paranaenses: determinantes e hierarquização. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v. 45, n. 2, p. 329-365, abr./jun., 2007. Disponível em: https://www.scielo.br/j/resr/a/cBDhTKTHGdPfwGJ9zYdQpCF/. Acesso em: 19 out. 2023.

MELLO, J. C. C. B. S. de; MEZA, L. Â.; GOMES, E. G.; NETO, L. B. Curso de análise de envoltória de dados. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Gramado, p. 2520–2547, 2005. Disponível em: http://ws2.din.uem.br/~ademir/sbpo/sbpo2005/pdf/arq0289.pdf. Acesso em: 19 mai. 2023.

MERGONI, A.; D'INVERNO, G.; CAROSI, L. A composite indicator for measuring the environmental performance of water, wastewater, and solid waste utilities. **Utilities Policy**, [s. l.], v. 74, n. 101285, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178721001193. Acesso em: 7 set. 2024.

MORAIS, J. F.; CAMANHO, A. S. Evaluation of performance of European cities with the aim to promote quality of life improvements. **Omega**, v. 39, n. 4, p. 398-409, 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048310001052. Acesso em: 7 jul. 2024.

MOTA, T. R. de A. **Análise da inclusão de restrições aos pesos no modelo DDF com outputs indesejáveis**. 2022. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022. Disponível em: https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/30520/TESE%20FINAL%20DE%20TULIO%20RABELO.pdf. Acesso em: 7 jul. 2025.

MOURA, J. E. A.; CAMPOS, K. C. Assimetrias do desenvolvimento rural: uma análise para o Matopiba brasileiro. **Planejamento e Políticas Públicas**, [s. l.], n. 63, p. 1-30, 2023. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11883/7/ppp_n63_Artigo6_assimetrias_do_desenvolvimento_rural.pdf. Acesso em: 18 out. 2023.

MOURA, J. E. A.; SOUSA, E. P. de. Análise multidimensional do desenvolvimento rural nos municípios cearenses e pernambucanos. **Geosul**, Florianópolis, v. 35, n. 76, p. 706-730, 2020. Disponível em: https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/67389/44436. Acesso em: 6 out. 2023.

NIEMEYER, J.; VALE, M. M. Obstacles and opportunities for implementing a policy-mix for ecosystem-based adaptation to climate change in Brazil's Caatinga. **Land Use Policy**, [S. l.], v. 122, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837722004124. Acesso em: 16 out. 2023.

NOBRE, M. Desenvolvimento sustentável: origens e significado atual. In: AMAZONAS, M. C. (Org.). **Desenvolvimento sustentável: a institucionalização de um conceito**. Brasília: Ibama, 2002.

OCDE – Organisation for Economic Co-Operation and Development. **Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide.** 2008. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/handbook-on-constructing-composite-indicators-methodology-and-user-guide_9789264043466-en.html. Acesso em: 11 jun. 2024.

OGUNDEJI, A. A.; DONKOR, E.; MOTSOARI, C.; ONAKUSE, S. Impact of access to credit on farm income: policy implications for rural agricultural development in Lesotho. **Agrekon**, v. 57, n. 2, p. 152-166, 2018. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/03031853.2018.1483251?needAccess=true. Acesso em: 16 abr. 2025.

OLIVEIRA, F. S. S. Sistema financeiro e financiamento do setor agropecuário no contexto macroeconômico brasileiro: uma análise da evolução, magnitude e distribuição do crédito rural segundo regiões, os produtos e os produtores (2000-2010). 2016. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

OLIVEIRA, R. B.; ALVES, J. S.; SOUSA, E. P. Eficiência do setor agropecuário nordestino e seus determinantes em 2006 e 2017. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 55, n. 4, p. 123–141, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.61673/ren.2024.1591. Acesso em: 7 jul. 2025.

OLIVEIRA, R.; ZANELLA, A.; CAMANHO, A. S. A temporal progressive analysis of the social performance of mining firms based on a Malmquist index estimated with a Benefit of the Doubt directional model. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 267, n. 10, p. 121807, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620318540. Acesso em: 7 jul. 2025.

PEREIRA, M. Z.; LIMA, J. E.; BASTOS, S. Q. A. Potencial de desenvolvimento dos municípios baianos: Uma análise fatorial. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 47, n. 2, p. 141–157, 2016. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/view/630/. Acesso em: 7 jul. 2025.

PEREIRA, Marlos da Silva; SAUER, Leandro; FAGUNDES, Mayra Batista Bitencourt. Mensurando a sustentabilidade ambiental: uma proposta de índice para o Mato Grosso do Sul. **Interações**, Campo Grande, v. 17, n. 2, p. 327-338, 2016. DOI: https://doi.org/10.20435/1984042X2016215. Disponível em: https://www.scielo.br/j/inter/a/mkD6nrCZcDnxhJJ5PBpnZ5h/#. Acesso em: 25 out. 2023.

PREBISCH, R. El desarrollo económico de la América Latina y algunos de sus principales problemas. **Revista de Economia Política**, n. 17, São Paulo, 1957. Disponível em: https://www.cepal.org/es/publicaciones/40010-desarrollo-economico-la-america-latina-algunos-sus-principales-problemas. Acesso em: 25 jul. 2023.

QUEIROZ, M. G. de; SILVA, T. G. F. da; SOUZA, C. A. A. de; JARDIM, A. M. da R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. do N.; SOUZA, L. S. B. de; MOURA, M. S. B. de. Composition of Caatinga Species Under Anthropic Disturbance and Its Correlation with Rainfall Partitioning. **Floresta e Ambiente**, [S. l.], v. 28, n. 1, 2021. Disponível em: https://www.scielo.br/j/floram/a/NLMfrFhFRjMcnRQyLC9XThb/#. Acesso em: 5 out. 2023.

RAMOS, J. P. da S.; CERQUEIRA, C. A.; FERRAZ, M. I. F.; JESUS, C. M. de; GOMES, A. da S. Índices das bases que constituem o desenvolvimento rural do território Matopiba: uma abordagem a partir da análise factorial. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 55, n.

3, 2024. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/ren/article/view/1569. Acesso em: 21 out. 2024.

REIG-MARTÍNEZ, E.; GÓMEZ-LIMÓN, J. A.; PICAZO-TADEO, A. J. Ranking farms with a composite indicator of sustainability. **Agricultural Economics**, [s. l.], v. 42, n. 5, p. 561-575, 2011. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1574-0862.2011.00536.x?msockid=0b5d745969996b47012961aa68f26a9b. Acesso em: 7 mai. 2025.

RENZI, A.; PIACENTI, C. A. Local economic development index for Brazilian municipalities. **Informe GEPEC**, Toledo, v. 26, n. 3, p. 64-80, 2022. Disponível em: https://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/issue/archive. Acesso em: 27 out. 2023.

RIBEIRO, K.; SOUSA-NETO, E. R.; CARVALHO JUNIOR, J. A. de; LIMA, J. R. de S.; MENEZES, R. S. C.; DUARTE-NETO, P. J.; GUERRA, G. da S.; OMETTO, J. P. H. B. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of The Total Environment,** [S. l.], v. 571, p. 1048-1057, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716315418. Acesso em: 28 out. 2023.

ROGGE, N.; DE JAEGER, S.; LAVIGNE, C. Waste performance of NUTS 2-regions in the EU: a conditional directional distance Benefit-of-the-Doubt model. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 139, p. 19-32, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800916306930. Acesso em: 7 jan. 2024.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

SACHS, I. Desenvolvimento sustentável: desafio do século XXI. **Ambiente & Sociedade**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 214-216, 2004. Disponível em: https://www.scielo.br/j/asoc/a/qMFkZKMK3QrKBVGkyLwtMmQ/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 29 jul. 2023.

SALA-GARRIDO, R.; D'INVERNO, G.; CAMINHO, A. S. Assessing the quality of service of water companies: a 'Benefit of the Doubt' composite indicator. **Social Indicators Research**, [s. l.], v. 155, n. 1, p. 1-25, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11205-020-02588-1. Acesso em: 7 jul. 2025.

SAMBUICHI, R. H. R.; OLIVEIRA, M. Â. C. d; SILVA, A. P. M. da; LUEDEMANN, G. A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios. **Texto para Discussão**, Rio de Janeiro, n. 1782, 2012. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1050/1/TD_1782.pdf. Acesso em: 11 out. 2023.

SANTOS, R. R.; ROVER, S. Influência da governança pública na eficiência da alocação dos recursos públicos. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 53, n. 4, 2019. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rap/a/hgNrfWjKs9cRxh434YmKNQh/. Acesso em: 11 mai. 2025.

SARTORI, S.; LATRÔNICO, F.; CAMPOS, L. M. S. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma taxonomia no campo da literatura. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. XVII, n. 1, p. 1-22, 2014. Disponível em: https://www.scielo.br/j/asoc/a/yJ9gFdvcwTxMR5hyWtRR6SL/#. Acesso em: 23 ago. 2023.

SCHUMPETER, J. A. **Teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico**. Tradução de Maria Sílvia Possas. São Paulo: Editora Nova Cultural, 1997.

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. 2020. Disponível em: <SEEG-10-anos-v4.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023.

SEI – **SISTEMA ELETRÔNICO DE INFORMAÇÃO**. 2021. Disponível em: https://www.portalseibahia.saeb.ba.gov.br/sei-bahia. Acesso em: 21 jun. 2024.

SEN, A. **Desenvolvimento como liberdade**. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

SEVEN, U.; TUMEN, S. Agricultural credits and agricultural productivity: Cross-country evidence. **Discussion paper series,** [s. l.], v. 12930, 2020. Disponível em: https://docs.iza.org/dp12930.pdf. Acesso em: 8 jun. 2025.

SEIFORD, L. M.; ZHU, J. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. European **Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 142, n. 1, p. 16–20, 2002. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221701002934. Acesso em: 6 abr. 2025.

SHAKER, R. R.; SIRODOEV, I. G. Assessing sustainable development across Moldova using household and property composition indicators. **Habitat International**, [s. l.], v. 55, p. 192-204, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197397515301910. Acesso em: 7 abr. 2025.

SILVA, L. C.; JUSTO, W. R.; CAVALCANTE, W. V. Eficiência na agropecuária das regiões intermediárias nordestinas em 2017: uma análise em dois estágios (com uso de DEA e Tobit). **Revista Brasileira de Economia de Empresas**, v. 22, n. 2, 2022. Disponível em: https://portalrevistas.ucb.br/index.php/rbee/article/view/14082. Acesso em: 15 mai. 2025.

SILVA, J. F. B. A.; REBOUÇAS, S. M. D. P.; ABREU, M. C. S. de; RIBEIRO, M. da C. R. Construção de um índice de desenvolvimento sustentável e análise espacial das desigualdades nos municípios cearenses. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 52, n. 1, p. 149-168, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0034-7612163114. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rap/a/ywT6s5TkkNfkVWfLcsMrByd/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 1 out. 2023.

SILVA, R. M. A. da. Entre dois paradigmas: combate à seca e convivência com o Semiárido. **Sociedade e Estado**, Brasília, v. 18, n. 1/2, p. 339–360, jan./dez. 2003. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/index.php/ren/article/view/539#:~:text=O%20presente%20artigo%20analisa%20as%20rela%C3%A7%C3%B5es%20entre%20essas,com%20a%20irriga%

C3%A7%C3%A3o%20orientada%20para%20o%20mercado%20externo. Acesso em: 29 jul. 2023.

SOUZA, R. P. de. O desenvolvimento rural no Estado do Rio de Janeiro a partir de uma análise multidimensional. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 109-126, 2019. Disponível em: https://www.scielo.br/j/resr/a/D65xPzz6DKy6WyYCwTB75kB/. Acesso em: 29 out. 2023.

SOUZA, N. J. de. **Desenvolvimento econômico.** São Paulo: Atlas, 2005.

SOUZA, P.; HERSCHMANN, S.; ASSUNÇÃO, J. Política de crédito rural no Brasil: agropecuária, proteção ambiental e desenvolvimento econômico. **Climate Policy Initiative**, Rio de Janeiro, p. 1-64, 2020. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/pt-br/publication/politica-de-credito-rural-no-brasil-agropecuaria-protecao-ambiental-e-desenvolvimento-economico/. Acesso em: 8 jul. 2023.

SOUZA, P.; MOURÃO, J.; ASSUNÇÃO, J. Os impactos do crédito rural na agropecuária e no uso da terra: uma análise dos biomas brasileiros. **Climate Policy Initiative**, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.bing.com/search?q=Os+Impactos+do+Cr%C3%A9dito+Rural+na+Agropecu%C3%A1ria+e+no+Uso+da+Terra%3A+uma+An%C3%A1lise+dos+Biomas+Brasileiros&cvid=47d107b274e145b9b7fea4de5704f690&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOdIBBzc1OWowajSoAgCwAgA&FORM=ANAB01&PC=SMTS. Acesso em: 19 set. 2023.

STADUTO, J. A. R.; ORLANDI, M.; CHIOVETO, A. T. Desenvolvimento rural do Estado do Mato Grosso por bioma: uma análise do "vazio". **Revista Política e Planejamento Regional**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 3, p. 260–283, 2018. Disponível em: https://www.revistappr.com.br/artigos/publicados/artigo-desenvolvimento-rural-do-estado-do-mato-grosso-por-bioma-uma-analise-do-vazio.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

STEGE, A. L.; PARRÉ, J. L. Fatores que determinam o desenvolvimento rural nas microrregiões do Brasil. **Confins**, n. 19, nov. 2013. Disponível em: https://journals.openedition.org/confins/8640#:~:text=Os%20resultados%20apontam%20um%20desenvolvimento%20rural%20bastante%20heterog%C3%AAneo,o%20meio%20ambiente%2C%20o%20sistema%20educacional%20entre%20outros. Acesso em: 12 out. 2023.

SUDENE. **Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste,** 2017. Disponível em: www.gov.br/sudene. Acesso em: 9 abr. 2023.

SUEYOSHI, T.; YUAN, Y. Social Sustainability Measured by Intermediate Approach for DEA Environmental Assessment: Chinese Regional Planning for Economic Development and Pollution Prevention. **Energy Economics**, [s. l.], v. 66, p. 154-166, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988317302025. Acesso em: 2 out. 2023.

TALUKDER, B.; HIPEL, K. W.; VANLOON, G. W. Using multi-criteria decision analysis for assessing sustainability of agricultural systems. **Sustainable Development**, [s. l.], v. 26, n. 6,

p. 781–799, 2018. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sd.1848?msockid=0b5d745969996b47012961aa68f26a9b. Acesso em: 7 mai. 2025.

THANASSOULIS, E.; PORTELA, M. C.; ALLEN, R. Incorporating Value Judgments in DEA. In: COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; ZHU, J. (eds) Handbook on Data Envelopment Analysis. **International Series in Operations Research & Management Science**, Boston, v. 71, 2004. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-7798-X_4#citeas. Acesso em: 1 nov. 2024.

TOMA, P.; MIGLIETTA, P. P.; ZURLINI, G.; VALENTE, D.; PETROSILLO, I. A non-parametric bootstrap-data envelopment analysis approach for environmental policy planning and management of agricultural efficiency in EU countries. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 83, p. 132-143, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X17304624. Acesso em: 7 jun. 2025.

TSAPLES, G.; PAPATHANASIOU, J. B. Data envelopment analysis and the concept of sustainability: a review and analysis of the literature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 138, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120309485. Acesso em: 12 jul. 2023.

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**, [s. l.], v. 10, n. 13, p. 2277, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-7390/10/13/2277. Acesso em: 25 mai. 2025.

VALIZADEH, N.; HAYATI, D. Development and validation of an index to measure agricultural sustainability. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 280, n. 123797, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620338427. Acesso em: 8 jan. 2025.

VENTURA, A. C.; FERNÁNDEZ, L.; ANDRADE, J. C. S. Tecnologias sociais para enfrentamento às mudanças climáticas no semiárido: caracterização e contribuições. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, [s. l.], v. 44, p. 213-238, 2013. Disponível em: https://bnb.gov.br/revista/index.php/ren/article/view/29. Acesso em: 7 jul. 2025.

VIDOLI, F.; FUSCO, E.; PIGNATARO, G.; GUCCIO, C. Multi directional Robust Benefit of the Doubt model: an application to the measurement of the quality of acute care services in OECD countries. **Socio Economic Planning Sciences**, [s. l.], v. 93, n. 101877, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012124000764. Acesso em: 7 fev. 2025.

VIDOLI, F.; FUSCO, E.; PIGNATARO, G.; GUCCIO, C. Multi directional Robust Benefit of the Doubt model: an application to the measurement of the quality of acute care services in OECD countries. **Socio Economic Planning Sciences**, [s. l.], v. 93, n. 101877, 2024.

Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012124000764. Acesso em: 7 fev. 2025.

VIDOLI, F.; FUSCO, E.; MAZZIOTTA, C. Non-compensability in composite indicators: a robust Directional Frontier Method. **Social Indicators Research**, [s. l.], v. 122, p. 635–652, 2015. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11205-014-0710-y. Acesso em: 7 jul. 2024.

WBATUBA, B. B. R.; SILVEIRA, D. C. da; DEPONTI, C. M.; AREND, S. C. Práticas sustentáveis para legitimação organizacional no território: a opção entre a perspectiva da economia ambiental ou da economia ecológica. **Informe GEPEC**, Toledo, v. 26, n. 3, p. 144-165, 2022. Disponível em: https://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/index. Acesso em: 27 jul. 2023.

WILLIAMS, R. **O campo e a cidade: na história e na literatura**. São Paulo: Companhia das Letras, 2011.

WESZ JUNIOR, V. J. O. PRONAF pós-2014: intensificando a sua seletividade? **Grifos,** Chapecó, v. 30, n. 51, p. 89-113, 2021. Disponível em: https://www.scielo.br/j/resr/a/DQDX8hz6pypjmyfpWwSs8Ck/?format=html&lang=en. Acesso em: 27 jan. 2026.

WONG, Y. H.; BEASLEY, J. Restricting Weight Flexibility in Data Envelopment Analysis. **Journal of the Operational Research Society**, London, v. 41, p. 829–835, 1990. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1057/jors.1990.120. Acesso em: 11 nov. 2024.

YADAV, I. S.; RAO, M. S. Agricultural credit and productivity of crops in India: field evidence from small and marginal farmers across social groups. **Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 435-454, 2022. Disponível em: https://www.emerald.com/jadee/article/14/3/435/1232944/Agricultural-credit-and-productivity-of-crops-in. Acesso em: 18 jun. 2025.

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. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171500243X. Acesso em: 7 mar. 2024.

ZHOU, H.; YI, Y.; YAO, C.; JOE, Z. Data envelopment analysis application in sustainability: The origins, development and future directions. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 264, n. 1, p. 1-16, 2018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221717305623. Acesso em: 7 mai. 2025.

ANEXOS

Tabela A1: Resultados do índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano, modelo PCA

Código	Município	IDS	*Ranking*
2900108	Abaíra (BA)	0,200	48
2900207	Abaré (BA)	0,103	203
2900355	Adustina (BA)	0,194	56
2900405	Água Fria (BA)	0,170	78
2900504	Érico Cardoso (BA)	0,336	15
2901007	Amargosa (BA)	0,125	151
2901155	América Dourada (BA)	0,213	43
2901205	Anagé (BA)	0,065	258
2901304	Andaraí (BA)	0,193	57
2901353	Andorinha (BA)	0,134	131
2901403	Angical (BA)	0,073	249
2901502	Anguera (BA)	0,030	284
2901601	Antas (BA)	0,131	140
2901700	Antônio Cardoso (BA)	0,044	281
2901809	Antônio Gonçalves (BA)	0,147	111
2902005	Aracatu (BA)	0,150	107
2902104	Araci (BA)	0,152	104
2902500	Baianópolis (BA)	0,301	22
2902609	Baixa Grande (BA)	0,154	96
2902658	Banzaê (BA)	0,092	221
2902708	Barra (BA)	0,134	135
2902807	Barra da Estiva (BA)	0,256	30
2902906	Barra do Choça (BA)	0,202	46
2903003	Barra do Mendes (BA)	0,231	35
2903201	Barreiras (BA)	0,639	4
2903235	Barro Alto (BA)	0,243	33
2903276	Barrocas (BA)	0,116	168
2903508	Belo Campo (BA)	0,056	267
2903607	Biritinga (BA)	0,071	251
2903706	Boa Nova (BA)	0,044	280
2903805	Boa Vista do Tupim (BA)	0,108	189
2903904	Bom Jesus da Lapa (BA)	0,211	45
2903953	Bom Jesus da Serra (BA)	0,094	217
2904001	Boninal (BA)	0,191	60
2904050	Bonito (BA)	0,398	12
2904100	Boquira (BA)	0,093	219
2904209	Botuporã (BA)	0,085	230
2904308	Brejões (BA)	0,140	123
2904407	Brejolândia (BA)	0,051	273

2904506	Brotas de Macaúbas (BA)	0,129	145
2904605	Brumado (BA)	0,128	150
2904753	Buritirama (BA)	0,231	36
2904803	Caatiba (BA)	0,053	270
2904852	Cabaceiras do Paraguaçu (BA)	0,195	55
2905008	Caculé (BA)	0,161	88
2905107	Caém (BA)	0,089	227
2905156	Caetanos (BA)	0,102	206
2905206	Caetité (BA)	0,181	65
2905305	Cafarnaum (BA)	0,269	29
2905503	Caldeirão Grande (BA)	0,051	276
2905909	Campo Alegre de Lourdes (BA)	0,173	74
2906006	Campo Formoso (BA)	0,253	31
2906105	Canápolis (BA)	0,066	257
2906204	Canarana (BA)	0,272	27
2906402	Candeal (BA)	0,055	269
2906600	Candiba (BA)	0,065	259
2906709	Cândido Sales (BA)	0,185	64
2906808	Cansanção (BA)	0,104	200
2906824	Canudos (BA)	0,170	79
2906857	Capela do Alto Alegre (BA)	0,063	261
2906873	Capim Grosso (BA)	0,097	210
2906899	Caraíbas (BA)	0,090	224
2907103	Carinhanha (BA)	0,130	141
2907202	Casa Nova (BA)	0,193	58
2907301	Castro Alves (BA)	0,074	247
2907400	Catolândia (BA)	0,144	117
2907558	Caturama (BA)	0,107	192
2907608	Central (BA)	0,177	69
2907707	Chorrochó (BA)	0,051	275
2907806	Cícero Dantas (BA)	0,163	86
2907905	Cipó (BA)	0,096	215
2908101	Cocos (BA)	0,490	7
2908408	Conceição do Coité (BA)	0,157	92
2908705	Condeúba (BA)	0,135	130
2908804	Contendas do Sincorá (BA)	0,152	103
2908903	Coração de Maria (BA)	0,084	234
2909000	Cordeiros (BA)	0,108	190
2909109	Coribe (BA)	0,105	198
2909208	Coronel João Sá (BA)	0,106	197
2909307	Correntina (BA)	0,485	8
2909406	Cotegipe (BA)	0,190	61
2909505	Cravolândia (BA)	0,057	266
2909604	Crisópolis (BA)	0,118	164

2909703	Cristópolis (BA)	0,086	229
2909901	Curaçá (BA)	0,142	122
2910008	Dário Meira (BA)	0,114	174
2910107	Dom Basílio (BA)	0,115	170
2910305	Elísio Medrado (BA)	0,098	208
2910404	Encruzilhada (BA)	0,145	114
2910701	Euclides da Cunha (BA)	0,129	149
2910750	Fátima (BA)	0,142	121
2910776	Feira da Mata (BA)	0,106	195
2910800	Feira de Santana (BA)	0,148	110
2910859	Filadélfia (BA)	0,067	254
2911105	Formosa do Rio Preto (BA)	1,000	1
2911253	Gavião (BA)	0,029	285
2911303	Gentio do Ouro (BA)	0,117	166
2911402	Glória (BA)	0,436	11
2911659	Guajeru (BA)	0,142	120
2911709	Guanambi (BA)	0,152	102
2911857	Heliópolis (BA)	0,083	235
2911907	Iaçu (BA)	0,174	72
2912004	Ibiassucê (BA)	0,143	119
2912202	Ibicoara (BA)	0,579	5
2912400	Ibipeba (BA)	0,305	20
2912509	Ibipitanga (BA)	0,093	218
2912608	Ibiquera (BA)	0,108	191
2913002	Ibitiara (BA)	0,152	101
2913101	Ibititá (BA)	0,290	24
2913200	Ibotirama (BA)	0,201	47
2913309	Ichu (BA)	0,075	246
2913408	Igaporã (BA)	0,122	154
2913507	Iguaí (BA)	0,095	216
2913705	Inhambupe (BA)	0,249	32
2913804	Ipecaetá (BA)	0,052	272
2914000	Ipirá (BA)	0,062	263
2914109	Ipupiara (BA)	0,229	37
2914208	Irajuba (BA)	0,175	70
2914307	Iramaia (BA)	0,120	158
2914406	Iraquara (BA)	0,275	26
2914505	Irará (BA)	0,134	133
2914604	Irecê (BA)	0,295	23
2914703	Itaberaba (BA)	0,197	52
2915007	Itaeté (BA)	0,149	109
2915106	Itagi (BA)	0,198	50
2915353	Itaguaçu da Bahia (BA)	0,310	19
2915809	Itambé (BA)	0,087	228

2916401	Itapetinga (BA)	0,196	53
2916500	Itapicuru (BA)	0,174	71
2916708	Itaquara (BA)	0,113	177
2916807	Itarantim (BA)	0,111	183
2916856	Itatim (BA)	0,119	160
2916906	Itiruçu (BA)	0,153	97
2917003	Itiúba (BA)	0,090	225
2917102	Itororó (BA)	0,107	193
2917201	Ituaçu (BA)	0,216	42
2917334	Iuiu (BA)	0,068	253
2917359	Jaborandi (BA)	0,478	9
2917409	Jacaraci (BA)	0,140	125
2917508	Jacobina (BA)	0,131	138
2917607	Jaguaquara (BA)	0,171	77
2917706	Jaguarari (BA)	0,078	244
2918001	Jequié (BA)	0,197	51
2918100	Jeremoabo (BA)	0,152	99
2918308	Jitaúna (BA)	0,129	147
2918357	João Dourado (BA)	0,200	49
2918407	Juazeiro (BA)	0,389	13
2918506	Jussara (BA)	0,158	90
2918605	Jussiape (BA)	0,164	85
2918704	Lafaiete Coutinho (BA)	0,136	129
2918753	Lagoa Real (BA)	0,118	163
2919009	Lajedinho (BA)	0,123	152
2919058	Lajedo do Tabocal (BA)	0,134	132
2919108	Lamarão (BA)	0,096	214
2919157	Lapão (BA)	0,323	17
2919306	Lençóis (BA)	0,571	6
2919405	Licínio de Almeida (BA)	0,166	81
2919504	Livramento de Nossa Senhora (BA)	0,165	83
2919603	Macajuba (BA)	0,032	283
2919702	Macarani (BA)	0,097	211
2919801	Macaúbas (BA)	0,098	209
2919900	Macururé (BA)	0,033	282
2919959	Maetinga (BA)	0,163	87
2920007	Maiquinique (BA)	0,145	116
2920106	Mairi (BA)	0,139	126
2920205	Malhada (BA)	0,118	165
2920304	Malhada de Pedras (BA)	0,106	196
2920403	Manoel Vitorino (BA)	0,055	268
2920452	Mansidão (BA)	0,103	202
2920502	Maracás (BA)	0,111	182
2920809	Marcionílio Souza (BA)	0,062	262

2921054	Matina (BA)	0,073	248
2921203	Miguel Calmon (BA)	0,151	105
2921302	Milagres (BA)	0,110	185
2921401	Mirangaba (BA)	0,111	181
2921450	Mirante (BA)	0,129	148
2921500	Monte Santo (BA)	0,090	226
2921609	Morpará (BA)	0,149	108
2921708	Morro do Chapéu (BA)	0,229	38
2921807	Mortugaba (BA)	0,129	146
2921906	Mucugê (BA)	0,703	3
2922052	Mulungu do Morro (BA)	0,364	14
2922102	Mundo Novo (BA)	0,137	128
2922250	Muquém do São Francisco (BA)	0,168	80
2922656	Nordestina (BA)	0,119	159
2922706	Nova Canaã (BA)	0,080	239
2922730	Nova Fátima (BA)	0,066	256
2922805	Nova Itarana (BA)	0,108	188
2922854	Nova Redenção (BA)	0,145	115
2922904	Nova Soure (BA)	0,123	153
2923035	Novo Horizonte (BA)	0,172	76
2923050	Novo Triunfo (BA)	0,132	137
2923100	Olindina (BA)	0,100	207
2923209	Oliveira dos Brejinhos (BA)	0,147	112
2923357	Ourolândia (BA)	0,118	162
2923407	Palmas de Monte Alto (BA)	0,078	243
2923506	Palmeiras (BA)	0,150	106
2923605	Paramirim (BA)	0,219	40
2923704	Paratinga (BA)	0,091	223
2923803	Paripiranga (BA)	0,155	94
2924009	Paulo Afonso (BA)	0,138	127
2924058	Pé de Serra (BA)	0,132	136
2924207	Pedro Alexandre (BA)	0,114	172
2924306	Piatã (BA)	0,196	54
2924405	Pilão Arcado (BA)	0,021	286
2924504	Pindaí (BA)	0,080	240
2924603	Pindobaçu (BA)	0,153	98
2924652	Pintadas (BA)	0,114	173
2924702	Piripá (BA)	0,115	171
2924801	Piritiba (BA)	0,122	156
2924900	Planaltino (BA)	0,186	63
2925006	Planalto (BA)	0,144	118
2925105	Poções (BA)	0,114	175
2925253	Ponto Novo (BA)	0,187	62
2925402	Potiraguá (BA)	0,172	75

2925600	Presidente Dutra (BA)	0,305	21
2925709	Presidente Jânio Quadros (BA)	0,085	231
2925808	Queimadas (BA)	0,129	144
2925907	Quijingue (BA)	0,067	255
2925931	Quixabeira (BA)	0,091	222
2925956	Rafael Jambeiro (BA)	0,051	277
2926004	Remanso (BA)	0,109	187
2926103	Retirolândia (BA)	0,129	142
2926202	Riachão das Neves (BA)	0,436	10
2926301	Riachão do Jacuípe (BA)	0,122	155
2926400	Riacho de Santana (BA)	0,064	260
2926509	Ribeira do Amparo (BA)	0,109	186
2926608	Ribeira do Pombal (BA)	0,113	178
2926657	Ribeirão do Largo (BA)	0,076	245
2926707	Rio de Contas (BA)	0,146	113
2926806	Rio do Antônio (BA)	0,073	250
2926905	Rio do Pires (BA)	0,049	278
2927101	Rodelas (BA)	0,331	16
2927200	Ruy Barbosa (BA)	0,120	157
2927507	Santa Bárbara (BA)	0,058	264
2927606	Santa Brígida (BA)	0,105	199
2927903	Santa Inês (BA)	0,051	274
2928000	Santaluz (BA)	0,217	41
2928109	Santa Maria da Vitória (BA)	0,102	205
2928208	Santana (BA)	0,081	238
2928307	Santanópolis (BA)	0,069	252
2928406	Santa Rita de Cássia (BA)	0,192	59
2928505	Santa Terezinha (BA)	0,081	237
2928802	Santo Estêvão (BA)	0,103	201
2928901	São Desidério (BA)	0,891	2
2928950	São Domingos (BA)	0,157	91
2929057	São Félix do Coribe (BA)	0,179	67
2929255	São Gabriel (BA)	0,211	44
2929305	São Gonçalo dos Campos (BA)	0,111	184
2929370	São José do Jacuípe (BA)	0,103	204
2929701	Sátiro Dias (BA)	0,131	139
2929800	Saúde (BA)	0,116	169
2929909	Seabra (BA)	0,240	34
2930006	Sebastião Laranjeiras (BA)	0,165	82
2930105	Senhor do Bonfim (BA)	0,134	134
2930154	Serra do Ramalho (BA)	0,118	161
2930204	Sento Sé (BA)	0,057	265
2930303	Serra Dourada (BA)	0,096	213
2930402	Serra Preta (BA)	0,000	287

2930501	Serrinha (BA)	0,116	167
2930600	Serrolândia (BA)	0,079	241
2930758	Sítio do Mato (BA)	0,052	271
2930766	Sítio do Quinto (BA)	0,093	220
2930774	Sobradinho (BA)	0,179	68
2930808	Souto Soares (BA)	0,316	18
2930907	Tabocas do Brejo Velho (BA)	0,079	242
2931004	Tanhaçu (BA)	0,140	124
2931053	Tanque Novo (BA)	0,152	100
2931103	Tanquinho (BA)	0,113	179
2931301	Tapiramutá (BA)	0,159	89
2931509	Teofilândia (BA)	0,107	194
2931806	Tremedal (BA)	0,097	212
2931905	Tucano (BA)	0,083	236
2932002	Uauá (BA)	0,046	279
2932101	Ubaíra (BA)	0,157	93
2932408	Uibaí (BA)	0,283	25
2932457	Umburanas (BA)	0,181	66
2932606	Urandi (BA)	0,114	176
2932804	Utinga (BA)	0,154	95
2933000	Valente (BA)	0,164	84
2933059	Várzea da Roça (BA)	0,112	180
2933109	Várzea do Poço (BA)	0,084	233
2933158	Várzea Nova (BA)	0,220	39
2933307	Vitória da Conquista (BA)	0,174	73
2933406	Wagner (BA)	0,271	28
2933455	Wanderley (BA)	0,129	143
2933604	Xique-Xique (BA)	0,085	232

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela A2: Resultados do índice de sustentabilidade rural dos municípios do semiárido baiano, modelo DEA-BOD de distância direcional

Código	**Município**	**DEA-BOD sem restrição**	***Ranking***	**DEA-BOD com restrição**	***Ranking***
2900108	Abaíra (BA)	1,000	1	0,923	65
2900207	Abaré (BA)	0,920	212	0,695	204
2900355	Adustina (BA)	0,890	233	0,794	127
2900405	Água Fria (BA)	0,854	263	0,687	211
2900504	Érico Cardoso (BA)	1,000	1	0,897	79
2901007	Amargosa (BA)	1,000	1	1,000	1
2901155	América Dourada (BA)	1,000	1	1,000	1
2901205	Anagé (BA)	0,899	229	0,751	160

2901304	Andaraí (BA)	1,000	137	0,713	185
2901353	Andorinha (BA)	1,000	1	0,623	258
2901403	Angical (BA)	0,916	213	0,578	282
2901502	Anguera (BA)	0,947	190	0,652	236
2901601	Antas (BA)	1,000	1	0,759	150
2901700	Antônio Cardoso (BA)	0,887	237	0,673	227
2901809	Antônio Gonçalves (BA)	1,000	1	0,744	165
2902005	Aracatu (BA)	1,000	1	0,716	183
2902104	Araci (BA)	0,989	149	0,862	91
2902500	Baianópolis (BA)	1,000	1	0,832	104
2902609	Baixa Grande (BA)	1,000	1	0,781	135
2902658	Banzaê (BA)	0,958	177	0,610	265
2902708	Barra (BA)	0,914	216	0,692	207
2902807	Barra da Estiva (BA)	1,000	1	0,960	44
2902906	Barra do Choça (BA)	1,000	1	0,959	45
2903003	Barra do Mendes (BA)	1,000	1	0,963	43
2903201	Barreiras (BA)	1,000	1	0,990	33
2903235	Barro Alto (BA)	1,000	1	0,895	80
2903276	Barrocas (BA)	0,975	165	0,853	93
2903508	Belo Campo (BA)	1,000	1	1,000	1
2903607	Biritinga (BA)	0,852	264	0,576	283
2903706	Boa Nova (BA)	0,914	215	0,761	147
2903805	Boa Vista do Tupim (BA)	1,000	1	0,692	206
2903904	Bom Jesus da Lapa (BA)	0,937	195	0,722	176
2903953	Bom Jesus da Serra (BA)	0,986	152	0,826	109
2904001	Boninal (BA)	1,000	1	0,955	49
2904050	Bonito (BA)	1,000	1	0,959	46
2904100	Boquira (BA)	0,857	260	0,683	218
2904209	Botuporã (BA)	0,841	270	0,636	251
2904308	Brejões (BA)	0,975	164	0,862	90
2904407	Brejolândia (BA)	0,862	257	0,646	243
2904506	Brotas de Macaúbas (BA)	1,000	1	0,760	149
2904605	Brumado (BA)	0,958	179	0,695	205
2904753	Buritirama (BA)	1,000	1	1,000	1
2904803	Caatiba (BA)	1,000	1	0,682	220
2904852	Cabaceiras do Paraguaçu (BA)	1,000	1	0,991	32
2905008	Caculé (BA)	1,000	1	0,886	84
2905107	Caém (BA)	0,858	259	0,613	264
2905156	Caetanos (BA)	0,929	202	0,641	247
2905206	Caetité (BA)	1,000	1	1,000	1
2905305	Cafarnaum (BA)	1,000	1	0,934	53
2905503	Caldeirão Grande (BA)	0,758	287	0,541	287
2905909	Campo Alegre de Lourdes (BA)	1,000	1	0,803	123
2906006	Campo Formoso (BA)	0,970	169	0,706	195
2906105	Canápolis (BA)	0,820	279	0,609	267
2906204	Canarana (BA)	1,000	1	0,930	56

2906402	Candeal (BA)	0,905	222	0,639	248
2906600	Candiba (BA)	0,956	181	0,748	164
2906709	Cândido Sales (BA)	1,000	1	0,951	50
2906808	Cansanção (BA)	0,855	261	0,622	259
2906824	Canudos (BA)	0,968	171	0,742	166
2906857	Capela do Alto Alegre (BA)	0,937	196	0,768	144
2906873	Capim Grosso (BA)	0,871	253	0,757	153
2906899	Caraíbas (BA)	1,000	1	0,838	99
2907103	Carinhanha (BA)	0,912	218	0,636	252
2907202	Casa Nova (BA)	1,000	1	0,902	76
2907301	Castro Alves (BA)	0,834	272	0,699	200
2907400	Catolândia (BA)	1,000	1	0,711	190
2907558	Caturama (BA)	0,878	246	0,685	214
2907608	Central (BA)	0,958	178	0,806	120
2907707	Chorrochó (BA)	1,000	1	0,770	143
2907806	Cícero Dantas (BA)	1,000	1	0,723	175
2907905	Cipó (BA)	0,840	271	0,675	224
2908101	Cocos (BA)	1,000	1	0,831	106
2908408	Conceição do Coité (BA)	0,928	203	0,665	228
2908705	Condeúba (BA)	1,000	1	1,000	1
2908804	Contendas do Sincorá (BA)	0,947	191	0,647	242
2908903	Coração de Maria (BA)	0,979	160	0,625	256
2909000	Cordeiros (BA)	0,932	200	0,635	253
2909109	Coribe (BA)	0,883	241	0,586	280
2909208	Coronel João Sá (BA)	0,974	166	0,831	105
2909307	Correntina (BA)	1,000	1	0,829	107
2909406	Cotegipe (BA)	1,000	1	0,773	142
2909505	Cravolândia (BA)	0,900	226	0,788	129
2909604	Crisópolis (BA)	1,000	1	0,635	254
2909703	Cristópolis (BA)	0,922	209	0,636	250
2909901	Curaçá (BA)	1,000	1	1,000	1
2910008	Dário Meira (BA)	1,000	1	0,973	41
2910107	Dom Basílio (BA)	1,000	1	0,903	75
2910305	Elísio Medrado (BA)	1,000	1	0,911	71
2910404	Encruzilhada (BA)	0,901	225	0,673	226
2910701	Euclides da Cunha (BA)	0,850	266	0,654	234
2910750	Fátima (BA)	1,000	1	0,842	95
2910776	Feira da Mata (BA)	1,000	1	0,798	126
2910800	Feira de Santana (BA)	1,000	1	0,869	88
2910859	Filadélfia (BA)	0,872	250	0,625	255
2911105	Formosa do Rio Preto (BA)	1,000	1	1,000	1
2911253	Gavião (BA)	0,880	244	0,653	235
2911303	Gentio do Ouro (BA)	0,948	188	0,682	221
2911402	Glória (BA)	1,000	1	1,000	1
2911659	Guajeru (BA)	0,936	197	0,751	158
2911709	Guanambi (BA)	1,000	1	1,000	1

2911857	Heliópolis (BA)	0,798	282	0,644	245
2911907	Iaçu (BA)	0,947	192	0,767	145
2912004	Ibiassucê (BA)	1,000	1	0,910	72
2912202	Ibicoara (BA)	1,000	1	1,000	1
2912400	Ibipeba (BA)	1,000	1	0,988	35
2912509	Ibipitanga (BA)	0,863	254	0,677	223
2912608	Ibiquera (BA)	1,000	1	0,709	192
2913002	Ibitiara (BA)	1,000	1	0,937	52
2913101	Ibititá (BA)	1,000	1	1,000	1
2913200	Ibotirama (BA)	1,000	1	0,842	96
2913309	Ichu (BA)	1,000	1	0,606	271
2913408	Igaporã (BA)	1,000	1	0,932	54
2913507	Iguaí (BA)	0,991	147	0,809	117
2913705	Inhambupe (BA)	1,000	1	0,726	174
2913804	Ipecaetá (BA)	0,915	214	0,817	115
2914000	Ipirá (BA)	0,851	265	0,649	240
2914109	Ipupiara (BA)	1,000	1	0,827	108
2914208	Irajuba (BA)	1,000	1	0,912	70
2914307	Iramaia (BA)	0,898	230	0,642	246
2914406	Iraquara (BA)	1,000	1	0,927	60
2914505	Irará (BA)	0,976	163	0,711	189
2914604	Irecê (BA)	1,000	1	1,000	1
2914703	Itaberaba (BA)	1,000	1	0,836	102
2915007	Itaeté (BA)	0,982	155	0,763	146
2915106	Itagi (BA)	1,000	1	0,977	39
2915353	Itaguaçu da Bahia (BA)	1,000	1	0,897	78
2915809	Itambé (BA)	0,949	187	0,785	132
2916401	Itapetinga (BA)	1,000	1	0,839	97
2916500	Itapicuru (BA)	0,984	153	0,713	186
2916708	Itaquara (BA)	1,000	1	1,000	1
2916807	Itarantim (BA)	1,000	1	0,869	87
2916856	Itatim (BA)	1,000	1	0,823	113
2916906	Itiruçu (BA)	1,000	1	1,000	1
2917003	Itiúba (BA)	0,862	258	0,594	277
2917102	Itororó (BA)	1,000	1	0,716	182
2917201	Ituaçu (BA)	1,000	1	1,000	1
2917334	Iuiu (BA)	0,900	227	0,651	237
2917359	Jaborandi (BA)	1,000	1	0,838	98
2917409	Jacaraci (BA)	0,999	138	0,749	162
2917508	Jacobina (BA)	0,978	161	0,778	139
2917607	Jaguaquara (BA)	1,000	1	1,000	1
2917706	Jaguarari (BA)	0,887	236	0,709	191
2918001	Jequié (BA)	1,000	1	0,919	69
2918100	Jeremoabo (BA)	0,923	207	0,780	136
2918308	Jitaúna (BA)	1,000	1	1,000	1
2918357	João Dourado (BA)	0,926	205	0,822	114

2918407	Juazeiro (BA)	1,000	1	1,000	1
2918506	Jussara (BA)	0,955	182	0,750	161
2918605	Jussiape (BA)	1,000	1	0,927	61
2918704	Lafaiete Coutinho (BA)	1,000	1	0,990	34
2918753	Lagoa Real (BA)	0,994	143	0,923	67
2919009	Lajedinho (BA)	0,962	175	0,688	208
2919058	Lajedo do Tabocal (BA)	1,000	1	0,890	82
2919108	Lamarão (BA)	0,921	210	0,607	270
2919157	Lapão (BA)	1,000	1	1,000	1
2919306	Lençóis (BA)	1,000	1	0,975	40
2919405	Licínio de Almeida (BA)	1,000	1	0,720	178
2919504	Livramento de Nossa Senhora (BA)	1,000	1	0,928	58
2919603	Macajuba (BA)	0,820	280	0,707	194
2919702	Macarani (BA)	1,000	1	0,858	92
2919801	Macaúbas (BA)	0,830	274	0,683	217
2919900	Macururé (BA)	1,000	1	0,922	68
2919959	Maetinga (BA)	1,000	1	1,000	1
2920007	Maiquinique (BA)	1,000	1	0,886	83
2920106	Mairi (BA)	1,000	1	0,863	89
2920205	Malhada (BA)	0,888	234	0,654	233
2920304	Malhada de Pedras (BA)	0,964	173	0,761	148
2920403	Manoel Vitorino (BA)	0,980	158	0,757	152
2920452	Mansidão (BA)	0,879	245	0,735	169
2920502	Maracás (BA)	1,000	1	0,880	86
2920809	Marcionílio Souza (BA)	0,971	168	0,639	249
2921054	Matina (BA)	0,887	235	0,659	230
2921203	Miguel Calmon (BA)	0,972	167	0,651	238
2921302	Milagres (BA)	0,913	217	0,733	171
2921401	Mirangaba (BA)	1,000	1	0,987	36
2921450	Mirante (BA)	0,955	183	0,623	257
2921500	Monte Santo (BA)	0,872	249	0,592	278
2921609	Morpará (BA)	0,986	150	0,778	140
2921708	Morro do Chapéu (BA)	1,000	1	0,925	63
2921807	Mortugaba (BA)	1,000	1	0,649	241
2921906	Mucugê (BA)	1,000	1	0,979	38
2922052	Mulungu do Morro (BA)	1,000	1	0,901	77
2922102	Mundo Novo (BA)	1,000	1	0,971	42
2922250	Muquém do São Francisco (BA)	1,000	1	0,781	134
2922656	Nordestina (BA)	0,986	151	0,850	94
2922706	Nova Canaã (BA)	0,992	146	0,619	260
2922730	Nova Fátima (BA)	0,979	159	0,688	209
2922805	Nova Itarana (BA)	0,883	243	0,675	225
2922854	Nova Redenção (BA)	1,000	1	0,759	151
2922904	Nova Soure (BA)	0,825	277	0,618	261
2923035	Novo Horizonte (BA)	1,000	1	0,942	51

2923050	Novo Triunfo (BA)	0,909	221	0,687	212
2923100	Olindina (BA)	0,994	144	0,685	213
2923209	Oliveira dos Brejinhos (BA)	0,977	162	0,754	156
2923357	Ourolândia (BA)	0,877	247	0,684	215
2923407	Palmas de Monte Alto (BA)	0,932	199	0,775	141
2923506	Palmeiras (BA)	1,000	1	0,957	48
2923605	Paramirim (BA)	1,000	1	0,836	103
2923704	Paratinga (BA)	0,953	184	0,726	173
2923803	Paripiranga (BA)	0,969	170	0,805	121
2924009	Paulo Afonso (BA)	0,845	268	0,730	172
2924058	Pé de Serra (BA)	0,883	242	0,683	219
2924207	Pedro Alexandre (BA)	0,871	252	0,699	201
2924306	Piatã (BA)	1,000	1	1,000	1
2924405	Pilão Arcado (BA)	0,821	278	0,569	285
2924504	Pindaí (BA)	0,999	139	0,753	157
2924603	Pindobaçu (BA)	1,000	1	0,715	184
2924652	Pintadas (BA)	1,000	1	0,806	118
2924702	Piripá (BA)	0,981	156	0,719	179
2924801	Piritiba (BA)	1,000	1	0,928	59
2924900	Planaltino (BA)	1,000	1	0,923	66
2925006	Planalto (BA)	1,000	1	0,741	167
2925105	Poções (BA)	0,961	176	0,704	197
2925253	Ponto Novo (BA)	0,967	172	0,681	222
2925402	Potiraguá (BA)	1,000	1	0,892	81
2925600	Presidente Dutra (BA)	1,000	1	1,000	1
2925709	Presidente Jânio Quadros (BA)	0,941	194	0,838	100
2925808	Queimadas (BA)	0,996	141	0,825	110
2925907	Quijingue (BA)	0,794	285	0,613	263
2925931	Quixabeira (BA)	0,933	198	0,786	131
2925956	Rafael Jambeiro (BA)	0,797	283	0,588	279
2926004	Remanso (BA)	1,000	1	0,926	62
2926103	Retirolândia (BA)	0,949	186	0,791	128
2926202	Riachão das Neves (BA)	0,957	180	0,825	111
2926301	Riachão do Jacuípe (BA)	0,950	185	0,756	154
2926400	Riacho de Santana (BA)	0,893	231	0,707	193
2926509	Ribeira do Amparo (BA)	0,862	256	0,665	229
2926608	Ribeira do Pombal (BA)	0,862	255	0,697	203
2926657	Ribeirão do Largo (BA)	0,992	145	0,779	138
2926707	Rio de Contas (BA)	1,000	1	0,930	57
2926806	Rio do Antônio (BA)	0,911	219	0,716	181
2926905	Rio do Pires (BA)	0,910	220	0,596	275
2927101	Rodelas (BA)	1,000	1	1,000	1
2927200	Ruy Barbosa (BA)	0,942	193	0,713	188
2927507	Santa Bárbara (BA)	0,884	239	0,594	276
2927606	Santa Brígida (BA)	0,832	273	0,702	199
2927903	Santa Inês (BA)	0,884	240	0,787	130

2928000	Santaluz (BA)	1,000	1	0,994	31
2928109	Santa Maria da Vitória (BA)	0,980	157	0,718	180
2928208	Santana (BA)	0,890	232	0,607	269
2928307	Santanópolis (BA)	1,000	1	0,557	286
2928406	Santa Rita de Cássia (BA)	0,925	206	0,657	231
2928505	Santa Terezinha (BA)	0,922	208	0,811	116
2928802	Santo Estêvão (BA)	0,929	201	0,687	210
2928901	São Desidério (BA)	1,000	1	1,000	1
2928950	São Domingos (BA)	1,000	1	0,909	73
2929057	São Félix do Coribe (BA)	1,000	1	0,720	177
2929255	São Gabriel (BA)	1,000	1	0,837	101
2929305	São Gonçalo dos Campos (BA)	1,000	1	0,803	122
2929370	São José do Jacuípe (BA)	0,885	238	0,779	137
2929701	Sátiro Dias (BA)	1,000	1	0,755	155
2929800	Saúde (BA)	1,000	1	0,657	232
2929909	Seabra (BA)	1,000	1	0,958	47
2930006	Sebastião Laranjeiras (BA)	1,000	1	0,785	133
2930105	Senhor do Bonfim (BA)	0,921	211	0,751	159
2930154	Serra do Ramalho (BA)	0,805	281	0,602	272
2930204	Sento Sé (BA)	0,989	148	0,802	124
2930303	Serra Dourada (BA)	0,872	251	0,618	262
2930402	Serra Preta (BA)	0,849	267	0,596	274
2930501	Serrinha (BA)	1,000	1	0,749	163
2930600	Serrolândia (BA)	0,900	228	0,684	216
2930758	Sítio do Mato (BA)	0,797	284	0,575	284
2930766	Sítio do Quinto (BA)	0,844	269	0,734	170
2930774	Sobradinho (BA)	1,000	1	1,000	1
2930808	Souto Soares (BA)	1,000	1	0,931	55
2930907	Tabocas do Brejo Velho (BA)	0,825	276	0,586	281
2931004	Tanhaçu (BA)	1,000	1	1,000	1
2931053	Tanque Novo (BA)	1,000	1	0,798	125
2931103	Tanquinho (BA)	0,983	154	0,740	168
2931301	Tapiramutá (BA)	1,000	1	0,983	37
2931509	Teofilândia (BA)	0,927	204	0,806	119
2931806	Tremedal (BA)	0,904	223	0,703	198
2931905	Tucano (BA)	0,783	286	0,609	268
2932002	Uauá (BA)	0,874	248	0,698	202
2932101	Ubaíra (BA)	1,000	1	1,000	1
2932408	Uibaí (BA)	1,000	1	1,000	1
2932457	Umburanas (BA)	1,000	1	0,883	85
2932606	Urandi (BA)	0,995	142	0,704	196
2932804	Utinga (BA)	0,962	174	0,824	112
2933000	Valente (BA)	1,000	1	0,909	74
2933059	Várzea da Roça (BA)	0,854	262	0,610	266
2933109	Várzea do Poço (BA)	0,901	224	0,713	187
2933158	Várzea Nova (BA)	1,000	1	0,995	30

2933307	Vitória da Conquista (BA)	1,000	1	0,925	64
2933406	Wagner (BA)	0,996	140	0,649	239
2933455	Wanderley (BA)	0,947	189	0,598	273
2933604	Xique-Xique (BA)	0,829	275	0,644	244