

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Determinantes das eficiências técnica e ambiental da pecuária leiteira
brasileira conduzida por pequenos produtores**

Mariza de Almeida

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

**Piracicaba
2024**

Mariza de Almeida
Bacharel em Ciências Econômicas

**Determinantes das eficiências técnica e ambiental da pecuária leiteira brasileira
conduzida por pequenos produtores**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **CARLOS JOSÉ CAETANO BACHA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

Piracicaba
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Almeida, Mariza de

Determinantes das eficiências técnica e ambiental da pecuária leiteira brasileira conduzida por pequenos produtores / Mariza de Almeida. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2024.

133 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Produção de leite 2. Fronteira estocástica 3. Eficiências I. Título

Dedico à minha família, por todo
carinho, apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha saúde e pelas oportunidades que ele tem me proporcionado. Por ter cuidado de mim, da minha família e amigos, principalmente no período pandêmico da covid-19.

Agradeço a minha família por sempre estarem me apoiando e incentivando a alcançar meus objetivos pessoais e profissionais. À minha mãe, Clair, ao meu pai, Raul, aos meus irmãos, Mauricio e Marlus, a minha avó, Amélia, e ao meu companheiro de vida, Renan, obrigada por estarem ao meu lado nessa jornada, por serem meus exemplos de determinação.

Aos amigos que a vida e a ESALQ me apresentaram: Camilla, Fábio, Willian, Wilson, Adirson, Elisangela, Angel, Felipe Miranda, Felipe Gurgel, Nayara, muito obrigada por todo incentivo e parceria nos estudos. Letícia, Nathalia e Isabela por sempre me apoiarem. Vocês foram essenciais!

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada da ESALQ/USP. Em especial, ao Prof. Carlos José Caetano Bacha por me guiar na tese, pelos conselhos, pelo incentivo e pela oportunidade de ser pesquisadora no Cepea Setor Florestal. Tê-lo como orientador foi fundamental e o levo como um exemplo de profissional.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (Senar), na pessoa do Daniel, da Andréa, do Eduardo e do Bruno, por disponibilizarem os dados utilizados na presente tese e pelo apoio oferecido.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro concedido, fundamental para realização do doutorado.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	19
1.2 Estrutura do trabalho	20
2. REVISÃO DA LITERATURA SOBRE EFICIÊNCIA TÉCNICA E AMBIENTAL NAS PRODUÇÕES NACIONAL E INTERNACIONAL DE LEITE	23
3. PECUÁRIA LEITEIRA E MEIO AMBIENTE.....	35
3.1 Panorama da pecuária leiteira no Brasil	35
3.2 Assistência Técnica e Extensão Rural no Brasil	38
3.3 Relação entre a pecuária leiteira e o meio ambiente	43
3.4 Relação entre eficiência técnica da pecuária leiteira e emissões do gás metano.....	45
4. REFERENCIAIS TEÓRICO E METODOLÓGICO	49
4.1 Teoria sobre a função da produção.....	49
4.2 Modelos de fronteira e de metafronteira estocástica	53
4.2.3 Testes	62
4.3 Analisando os determinantes da eficiência ambiental.....	63
4.4 Base de dados e variáveis selecionadas	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.1 Produtores de leite assistidos pelo Programa de Assistência Técnica e Gerencial do SENAR.....	71
5.2 Estimativas e seleção do melhor modelo para quantificar a fronteira de produção	77
5.2.1 Estimativas das funções estocásticas e da metafronteira.....	77
5.2.2 Valores das eficiências técnica e ambiental, da taxa de metatecnologia e das metaeficiências calculados por diferentes modelos de fronteira estocástica e através da metafronteira.....	89
5.3 Diferenças regionais nas metaeficiências técnica e ambiental	95
5.4 Metaeficiência ambiental e seus determinantes.....	99

6. CONCLUSÃO	109
REFERÊNCIAS	115
APÊNDICE	123
ANEXO	133

RESUMO

Determinantes das eficiências técnica e ambiental da pecuária leiteira brasileira conduzida por pequenos produtores

A pecuária leiteira, fortemente conduzida por pequenos produtores, é importante atividade agropecuária no meio rural brasileiro, no qual gera emprego e renda. Não obstante, esta atividade, em especial, desde os anos 2000, tem enfrentado críticas devido aos impactos ambientais negativos que gera, em especial quanto a emissões de gás metano provenientes da fermentação entérica dos animais. Algumas instituições, como o Banco Mundial e a FAO, estão propagando a ideia de que é possível reduzir essas emissões via a redução da atividade ou por meio de ganhos de eficiência técnica. Motivado pelo acima exposto, esta tese tem como objetivo geral estimar e analisar os níveis de eficiência técnica e ambiental dos pequenos produtores de leite no Brasil, identificando os seus principais determinantes e avaliando de que modo a escala de produção e a eficiência técnica afetam a eficiência ambiental desta atividade. A tese assume a pressuposição de que os produtores de leite do Brasil não adotam a mesma tecnologia em suas macrorregiões e, portanto, modelo que estime as eficiências técnica e ambiental que considerem esta heterogeneidade tecnológica (como a metafronteira) pode gerar resultados mais confiáveis do que assumir uma única fronteira de produção para todo o país. Para atingir o objetivo da tese, microdados referentes a produtores de leite atendidos pelo Programa de Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) do Senar, e referentes ao ano de 2021, são utilizados. Estimam-se, em uma primeira etapa, seis modelos alternativos que consideram as formas funcionais Cobb-Douglas ou Translog e uma única fronteira de produção (chamado de Modelo I, que assume não haver diferença tecnológica entre os produtores de diferentes regiões do Brasil), a fronteira estocástica que introduz *dummies* por região (chamado de Modelo II, como se apenas o intercepto da função de produção variasse entre as regiões) e a metafronteira (Modelo III), que seria uma envoltória das fronteiras estocásticas distintas por regiões. Constata-se que a metafronteira gera bons resultados estatísticos, sendo que, em média, no país, o nível de metaeficiência técnica média dos pequenos produtores analisados foi de 74% e a metaeficiência ambiental foi de 64%. Constata-se, também, que as metaeficiências técnicas calculadas usando a metafronteira com Cobb-Douglas não são idênticas às metaeficiências técnicas obtidas com a Translog, mas essas diferenças não são estatisticamente significativas. Devido à metaeficiência ambiental só ser possível de ser calculada com a versão Translog da Metafronteira, a mesma é utilizada e estimam-se regressões múltiplas em que a metaeficiência ambiental é explicada pela metaeficiência técnica e pela escala de produção. Para todos os produtores agrupados em nível de Brasil constata-se que o aumento de 1% na metaeficiência técnica causa elevação de 1,59% da metaeficiência ambiental das pequenas propriedades leiteiras. Esta elasticidade varia de 1 na Região Sul a 1,81 no Nordeste. Esses resultados corroboram com a proposta feita pelos organismos internacionais sobre a sinergia positiva existente entre a eficiência ambiental e a técnica e servem de estímulo a políticas que levem à melhoria técnica da atividade analisada.

Palavras-chave: Produção de leite, Fronteira estocástica, Eficiências

ABSTRACT

Determinants of the technical and environmental efficiencies of the Brazilian dairy farming conducted by small producers

Dairy farming, predominantly driven by small-scale producers, is a crucial agricultural activity in Brazilian rural areas, contributing significantly to employment and income generation. However, since the 2000s, this sector has faced criticism due to its negative environmental impacts, particularly concerning methane emissions from the enteric fermentation of animals. Institutions such as the World Bank and FAO are advocating for the reduction of these emissions through either decreasing activity or enhancing its technical efficiency. Motivated by the aforementioned facts, this thesis aims to estimate and analyze the levels of technical and environmental efficiency among small-scale dairy producers in Brazil, identifying their key determinants and assessing how production scale and technical efficiency influence the environmental efficiency of this activity. The thesis assumes that dairy producers in Brazil do not uniformly adopt the same technology across the country macro-regions. Therefore, a model estimating technical and environmental efficiencies considering this technological heterogeneity (such as the metafrontier) may yield more reliable results than assuming a single production frontier for the entire country. To achieve the thesis objective, microdata from dairy producers enrolled in the Technical and Managerial Assistance Program (ATeG) of Senar, for the year 2021, are utilized. In the initial phase, six alternative models are run, incorporating Cobb-Douglas or Translog functional forms and a single production frontier (named to as Model I, assuming no technological differences among producers in different regions of Brazil), the stochastic frontier introducing region-specific dummies (Model II, assuming that only the intercept of the production function varies among regions), and the metafrontier (Model III), which would be an envelope of stochastic frontiers different by regions. It is observed that the metafrontier yields satisfactory statistical results. On average, across the country, the mean meta-technical efficiency of the analyzed small-scale producers was 74%, while the meta-environmental efficiency was 64%. Furthermore, meta-technical efficiencies calculated using the metafrontier with Cobb-Douglas are not identical to those obtained with Translog, but these differences are not statistically significant. Due to the feasibility of calculating meta-environmental efficiency can only be done with the Translog version of the metafrontier, it is employed, and multiple regressions are run where meta-environmental efficiency is explained by meta-technical efficiency and production scale. For all producers grouped at the national level, a 1% increase in meta-technical efficiency results in a 1.59% rise in meta-environmental efficiency for small dairy properties. This elasticity varies from 1 in the Southern region to 1.81 in the Northeast. These results sustain the proposition made by international organizations regarding the positive synergy between environmental and technical efficiency, serving as an encouragement for policies aimed at improving the technical aspects of the mentioned activity.

Keywords: Milk production, Stochastic frontier, Efficiencies

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição percentual, entre as regiões brasileiras, dos estabelecimentos agropecuários que tiveram orientação técnica em 2017	40
Figura 2 - Fluxograma da metodologia aplicada pela Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) do Senar	42
Figura 3 - Modelo de função metafronteira	50
Figura 4 - Decomposição da metafronteira	60
Figura 5 - Resumo dos três modelos (abordagens) utilizados na estimação da fronteira de produção e das eficiências técnicas	62
Figura 6 - Distribuição dos índices de metaeficiências estimados pela metafronteira, regiões do Brasil.....	98
Figura 7 - Associação das metaeficiências técnica e ambiental	101
Figura 8 - Mapa perceptual para metaeficiência ambiental, metaeficiência técnica, produção de leite e regiões	102
Figura A1 - Autorização do Senar para uso dos dados da ATeG.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição da pecuária brasileira de leite em 2017, por região do país	37
Tabela 2 - Fatores de emissão de CH ₄ , segundo a produtividade do rebanho bovino leiteiro. 68	
Tabela 3 - Distribuição das propriedades que conduzem a pecuária leiteira em 2021 e atendidas pelo ATeG-Senar, conforme perfil fundiário.....	75
Tabela 4 - Características das 4.767 propriedades de pecuária leiteira e atendidas no programa ATeG em 2021	75
Tabela 5 – Resultados da fronteira estocástica – variável dependente é produção de leite	80
Tabela 6 - Resultados da metafronteira estocástica (Modelo III) – usando Cobb-Douglas – variável dependente é produção de leite	84
Tabela 7 - Resultados da metafronteira estocástica (Modelo III) – usando Translog – variável dependente é produção de leite	85
Tabela 8 - Valores médios das eficiências técnica e ambiental, da taxa de metatecnologia e das metaeficiências para o Brasil e suas regiões	89
Tabela 9 - Resultados do teste <i>t</i> de <i>Student</i> para as diferenças entre as estimativas de eficiência e metaeficiência técnica obtidas através de três abordagens de fronteira estocástica.....	92
Tabela 10 - Resultados do teste <i>t</i> de <i>Student</i> para as estimativas de eficiência e metaeficiência técnica obtida usando alternativamente as formas funcionais Cobb-Douglas e Translog, mas empregando o mesmo modelo de fronteira estocástica	93
Tabela 11 - Determinantes da metaeficiência ambiental no Brasil e nas suas regiões – regressão múltipla	104
Tabela A1 - Testes para escolha do modelo mais adequado de fronteira estocástica.....	128
Tabela A2 - Resultado do teste de Razão de Verossimilhança para identificar a forma funcional mais adequada para estimação da fronteira de produção	129
Tabela A3 - Teste para verificar a presença de ineficiência	130
Tabela A4 - Resultado do teste de Razão de Verossimilhança para identificar se os produtores das cinco macrorregiões compartilham ou não da mesma tecnologia	130
Tabela A5 - Valores para o teste Qui-Quadrado na Análise de Correspondência Múltipla ..	131
Tabela A6 - Decomposição inercial - Análise de Correspondência Múltipla.....	131
Tabela A7 - Testes aplicados nas regressões múltiplas	132

LISTA DE SIGLAS

ABCAR	Associação Brasileira de Crédito e Assistência Rural
ACAR	Associação de Crédito e Assistência Rural
ANATER	Agência Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural
ATeG	Assistência Técnica e Gerencial
ATER	Assistência técnica e extensão rural
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACM	Análise de Correspondência Múltipla
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i> - Análise Envoltória de Dados
EA	Eficiência ambiental
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMBRATER	Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural
ET	Eficiência técnica
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
GEE	Gás de Efeito Estufa
Gg	Gigagramas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	Instrução Normativa
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> - Painel Intergovernamental de Mudança Climática
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação
MEA	Metaeficiência ambiental
MET	Metaeficiência técnica
MTR	<i>Metatechnology Ratio</i> - Taxa metatecnológica
PIB	Produto Interno Bruto
PNATER	Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SENAR	Serviço Nacional de Aprendizagem Rural
SFA	<i>Stochastic Frontier Analysis</i>
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SMF	<i>Stochastic metafrontier</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i> – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
VBP	Valor Bruto da Produção

1. INTRODUÇÃO

A bovinocultura leiteira está presente em todas as regiões brasileiras e pode ser conduzida pelo produtor pequeno, médio ou grande. Esta atividade tem participação importante na geração de renda dos produtores, assim como na compra de insumos e fornecimento de leite para as agroindústrias, formando uma das cadeias produtivas mais representativas do agronegócio brasileiro.

A produção brasileira de leite de vaca é a quinta maior do mundo. Conforme o *United States Department of Agriculture* (USDA, 2023), ela representava 4% da produção mundial de leite em 2022, sendo que o Brasil detinha o segundo maior rebanho de vacas ordenhadas do Mundo neste ano. Não obstante, conforme o Censo Agropecuário do Brasil, em 2017 a produtividade da bovinocultura brasileira foi de 2.621 litros/vaca/ano, muito aquém quando comparada com a produtividade de outros países. Por exemplo, no mesmo ano de 2017, os Estados Unidos apresentaram produtividade de 10.393 litros/vaca/ano, a Argentina de 6.034 litros/vaca/ano e a China de 4.340 litros/vaca/ano (USDA, 2023).

De acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA, 2023), a agropecuária apresentou valor bruto da produção (VBP) de R\$ 1,32 trilhão em 2022, sendo o leite o quarto produto com maior destaque, totalizando R\$ 87,7 bilhões. Entre 2000 e 2021, a produção de leite no Brasil (em quantidade de litros) cresceu 79%. Entretanto, essa elevação na produção não foi suficiente para tornar sempre positivo o saldo da balança comercial da cadeia leiteira¹. No período de 2000 a 2022, houve apenas superávit comercial dessa balança em três anos, a saber: 2004, 2007 e 2008 (BRASIL, 2023a).

A baixa produtividade e a balança comercial negativa da cadeia leiteira é reflexo de um crescimento desuniforme da sua produção no Brasil. Apesar do novo contexto macroeconômico instalado a partir da década de 1990 – caracterizado, entre outros, pela maior abertura comercial, pelo fim do tabelamento de preços do leite, por pressões pelo aumento da competitividade, pelo surgimento e adoção de novas tecnologias (referentes ao manejo, genética e maquinários) na pecuária, por programas e normativas sobre a qualidade do leite – não houve homogeneidade entre os produtores em adotarem a mesma tecnologia, havendo, em todo o território nacional, diferentes sistemas de produção (tais como, por exemplo, confinamento, semiconfinamento ou criação a pasto), e, com isso, gerando discrepâncias na dimensão e modernidade da produção de leite entre as regiões. Além disso, a heterogeneidade na produção brasileira de leite de vaca está vinculada com a estrutura dos estabelecimentos, aos

¹ Consideram-se os seguintes códigos como filtro no site ComexStata - Posição SH4: 0401; 0402; 0403; 0404; 0405; e 3502.

fatores edafoclimáticos e às condições econômicas e ambientais de cada região produtora de leite (PEREIRA et al., 2016; ZOCCAL; DE SOUZA; GOMES, 2005).

Em 2017, a produção brasileira de leite de vaca totalizou 30,1 bilhões de litros, estando presente em 1.176.295 estabelecimentos agropecuários. A região Nordeste apresentou o maior número de estabelecimentos agropecuários que produziram leite (354.257), a região Sudeste se destacou pela maior produção de leite (11,1 bilhões de litros) e número de vacas ordenhadas (3,9 milhões de cabeças), e a região Sul pela maior produtividade (4.022 litros/vaca/ano). A região Norte apresentou a menor quantidade de vacas ordenhadas (1,3 milhão de cabeças), a menor produção de leite (1,9 bilhão de litros) e a menor produtividade (1.369 litros/vaca/ano), segundo os dados do IBGE (2017).

Historicamente, a região Sul apresenta o rebanho bovino leiteiro com maior produtividade, devido, em parte, ao grande uso da raça holandesa. A bovinocultura leiteira desta região se destaca por estar presente em pequenas propriedades que acessam crédito rural e assistência técnica, sendo consideradas propriedades que adotam tecnologias mais modernas, diante do padrão nacional, no processo produtivo da atividade analisada (BERNDT et al., 2015). A região Sudeste, e o estado de Minas Gerais, em particular, têm apresentado o maior rebanho leiteiro do Brasil, mas com o emprego de animais de raças diversas e adotando, segundo a área considerada dentro desta região, sistemas de produção intensivo, semiextensivo ou criado a pasto (FASSIO; REIS; GERALDO, 2006). A região Centro-Oeste é caracterizada por propriedades maiores e adotando, crescentemente, tecnologias modernas na produção, principalmente por meio de investimentos em recuperação das pastagens e na produção de grãos – que são usados na alimentação dos animais, normalmente na forma de rações (VILELA; ANDRADE, 2018). A região Nordeste concentra a maior quantidade de estabelecimentos agropecuários produtores de leite no Brasil, mas caracteriza-se, de maneira geral, pelo seu rebanho leiteiro mestiço e por maior presença relativa (em relação a outras regiões do Brasil) de produtores com menor acesso ao crédito rural e à assistência técnica (BERNDT et al., 2015). A região Norte, como um todo, pouco se destaca na produção de leite, e apresenta rebanho mestiço, e é marcada por propriedades que têm, relativamente às demais regiões, menor acesso à assistência técnica e ao crédito rural, e com elevadas restrições à produção agropecuária devido a questões legais e ambientais quanto ao uso do solo, pois suas áreas se encontram no bioma amazônico, e há problemas logísticos.

A melhora na produtividade e nas boas práticas da produção leiteira está relacionada ao acesso às tecnologias e informações, que podem ser promovidos pela assistência técnica, via, por exemplo, a provida pela extensão rural. De acordo com o Censo Agropecuário 2017, apenas

1 milhão de estabelecimentos agropecuários no Brasil receberam algum tipo de assistência técnica, estando 40% deles localizados na região Sul do Brasil (IBGE, 2017). Existem no Brasil, com ofertas diferentes em suas regiões, os serviços de assistência técnica públicos, os privados ou em parceria público-privado. Como, por exemplo de modelo público-privado tem-se a Assistência Técnica e Gerencial (ATeG), do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (Senar), iniciada em 2013, com foco em pessoas, visando maximizar a produção e o uso dos recursos de forma eficiente (SENAR, 2022a).

As pecuárias de corte e de leite, assim como todas as demais atividades da agropecuária, apresentam dois grandes desafios no século XXI: aumentar a qualidade e a quantidade dos produtos que elaboram e reduzir os impactos ambientais gerados por seus processos de produção. As críticas direcionadas à pecuária pelos impactos que ela está gerando ao meio ambiente (tais como as emissões de gases geradores do efeito estufa, desmatamento, erosão, queimadas e desertificação advindas do manejo de algumas pastagens) estão relacionadas, principalmente, com a expansão do rebanho bovino (FAO, 2018). Em 2017, o rebanho brasileiro de bovinos de corte foi de 161,2 milhões de cabeças e o rebanho de vacas ordenhadas foi de 11,5 milhões de cabeças (IBGE, 2017). Para o USDA (2023), o Brasil apresenta o segundo maior rebanho bovino de corte e de vacas ordenhadas do mundo. O crescimento da pecuária leiteira, principalmente pelo aumento no número de vacas ordenhadas, tem gerado debates atuais sobre o seu futuro e a estreita ligação com o bem-estar animal, com as mudanças climáticas e com o uso dos recursos naturais (VILELA et al., 2016).

Em 2020, o setor agropecuário foi responsável por 28,5% das emissões brasileiras de gases de efeito estufa, GEE (emitindo 477.670,5 Gg CO₂eq), com destaque para as emissões dos gases metano (CH₄), do dióxido de carbono (CO₂) e do óxido nitroso (S₂O), que resultam da fermentação entérica, do manejo de dejetos de animais, da queima de resíduos agrícolas e do manejo do solo. As emissões de CH₄ representaram 62,5% do total emitido de GEE pelo setor agropecuário, o qual tem como principal fonte daquela emissão a fermentação entérica² (a qual é responsável por 57% do total de emissões de CH₄ gerados pelo setor agropecuário). Os animais com maior participação nas emissões de gás metano proveniente de fermentação entérica foram os bovinos, os quais são responsáveis por 96,8% desta emissão (sendo 88,4 p.p oriundos de bovinos de corte, e 8,4 p.p. emitidos por vacas leiteiras); e os outros 3,2% das emissões de gás metano são provenientes de outros animais, por exemplo, búfalos, ovelhas, cabras, cavalos, mulas, asnos e suínos (BRASIL, 2022).

² A fermentação entérica é proveniente do processo digestivo de animais ruminantes e de animais não ruminantes, dentre eles o gado de leite, gado de corte, búfalos, cavalos e suínos (BERNDT et al., 2015).

Conforme dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2023), as regiões brasileiras que apresentaram as maiores estimativas de emissões de gás metano provenientes da fermentação entérica do gado de leite, no ano de 2022, foram: Sudeste (30%), Nordeste (23%) e Sul (22%). De acordo com dados do IBGE (2017), as regiões com os maiores rebanhos bovinos do Brasil são: Centro-Oeste, pelo tamanho de seu rebanho de bovinos de corte; e o Sudeste, pelo seu rebanho de vacas ordenhadas.

Para o IPCC, as emissões de metano provenientes de fontes antropogênicas contribuem para o aquecimento global em aproximadamente³ 0,5 °C. A FAO (2023), em seu relatório “*Methane emissions in livestock and rice systems*”⁴, menciona que as emissões de metano são resultantes de processos microbianos que acontecem durante o processo de fermentação entérica do gado, digestão anaeróbica e resíduos orgânicos. Nesse mesmo relatório, a FAO (2023) destaca que diversas estratégias podem ser adotadas para reduzir as emissões de metano, sem afetar o desempenho produtivo dos animais (dado o sistema de produção e as condições regionais), sendo que grande parte dessas estratégias estão relacionadas à raça, ao manejo e à dieta alimentar dos animais.

Para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, em especial do gás metano, algumas agências governamentais – tais como, por exemplo, *Food and Agriculture Organization (FAO)*, *World Bank e Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* – indicam duas maneiras. A está primeira relacionada com o *trade-off* entre crescimento econômico e a redução das emissões, ou seja, para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) deve-se reduzir a produção; a segunda, e mais indicada, é associada com a sinergia entre as eficiências, ou seja, quando a produção de um produto apresentar eficiência técnica ela também deverá apresentar eficiência ambiental. Além disso, ressalta-se que as estimativas de eficiências são importantes indicadores de desempenho do processo produtivo e da adoção de tecnologias pelos produtores de leite (CELE; HENNESSY; THORNE, 2023; O’DONNELL; RAO; BATTESE, 2008).

A sinergia entre eficiência técnica e ambiental na produção de leite em diversos países vem sendo investigada. Os estudos visam analisar como aumentar a produção de leite por meio de ganhos de produtividade e acompanhadas de menores impactos ambientais. Dentre as pesquisas nacionais⁵ que tratam desta temática têm-se, por exemplo: Silva e Bragagnolo (2018), que analisaram a eficiência técnica e ambiental de produtores de leite no estado de Minas

³ Na COP-26 o Brasil assinou o Compromisso Global do Metano (*Global Methane Pledge*), e se comprometeu a reduzir as emissões de metano em 30% até 2030 em relação aos níveis de 2020 (UNEP, 2023).

⁴ Em português: Emissões de metano em sistemas pecuários e de arroz.

⁵ Para mais detalhes sobre as pesquisas nacionais e internacionais que tratam dessa temática, consultar a revisão da literatura (Capítulo 2 desta Tese).

Gerais, e para tanto eles utilizaram a análise de Fronteira Estocástica proposta por Reinhard, Lovell e Thijssen (1999); Campos et al. (2018), que analisaram a eficiência técnica e ambiental dos produtores de leite de Minas Gerais, usando a Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis - DEA*). Em nível internacional, destacam-se dois estudos: Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) e Dayananda (2016). O trabalho de Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) é o precursor no uso da Fronteira Estocástica adaptada para analisar as eficiências técnica e ambiental. Este trabalho estimou essas duas eficiências para as fazendas leiteiras na Holanda. Dayananda (2016), seguindo os procedimentos de Reinhard, Lovell e Thijssen (1999), avaliou as eficiências para as propriedades leiteiras de Ontário, no Canadá.

Nas duas primeiras décadas do século XXI, a metafronteira passou a ser utilizada nos cálculos da eficiência. A metafronteira considera a potencial presença de heterogeneidade na adoção de tecnologia entre os membros da população analisada. Os trabalhos de Battese, Rao e O'Donnell (2004) e de O'Donnell, Rao e Battese (2008) foram os pioneiros no uso da metafronteira. E Huang, Huang e Liu (2014) aperfeiçoaram essa metodologia para estimar a eficiência usando somente a fronteira estocástica. Mesmo com as aplicações nos últimos 14 anos da metafronteira – ver, por exemplo, Moreira e Bravo-Ureta (2010), Jiang e Sharp (2015), Alem et al. (2019) – estudos que utilizam a metafronteira estocástica para analisar as eficiências técnica e ambiental de produtores de leite ainda são escassos, principalmente quando se consideram as diferenças regionais do Brasil e os determinantes das eficiências. Destaca-se que não foi encontrado, na literatura revisada, estudo que compare a eficiência técnica dos produtores de leite entre as regiões brasileiras – a saber, Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste – e que considere a heterogeneidade regional das tecnologias adotadas pelos produtores. Os estudos nacionais sobre a eficiência técnica na produção de leite são direcionados, principalmente, para a região Sudeste, com destaque para o estado de Minas Gerais.

A presente pesquisa utiliza os microdados referentes a produtores de leite do Brasil, que foram assistidos pela ATeG do SENAR, durante o ano de 2021. Esses microdados, além de serem mais recentes do que os que poderiam estar no Censo Agropecuário de 2017⁶, foram de possível acesso e contemplam produtores de leite das cinco macrorregiões do Brasil (Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste).

⁶ O Censo Agropecuário de 2017 traz informações sobre mais de 1 milhão de estabelecimentos agropecuários que produzem leite. Devido ao período da pandemia do Covid-19, o acesso aos microdados referentes a esses estabelecimentos foi inviabilizado de abril de 2020 a até abril de 2023, e, apesar de a autora desta Tese ter enviado pedido ao IBGE para acesso a esses microdados em fevereiro de 2022, nenhuma resposta deste órgão foi recebida até meados de janeiro de 2024, quando do término da Tese.

A Assistência Técnica e Gerencial (ATeG), conforme Senar (2022b), atende produtores rurais que atuam em diferentes atividades agropecuárias, em diferentes regiões e que possuem diferentes perfis fundiários. Em 2021, a atividade produtiva predominante no programa de ATeG foi a bovinocultura de leite, que correspondeu a aproximadamente 40% das propriedades atendidas pela ATeG-Senar. Nesse mesmo ano, o perfil dos produtores da bovinocultura de leite atendidos pela ATeG foi composto por 61% de minifúndios, 32,8% eram pequenas propriedades e 6,2% eram propriedades médias, grandes ou sem área registrada.

Os produtores de leite assistidos pela ATeG e analisados na presente tese se caracterizam por serem pequenos produtores, com idade média de 56 anos, obtendo produção média de 60 mil litros por ano, tendo em média 15 vacas em lactação e área média total da propriedade de 52 hectares.

Na literatura não há consenso sobre a definição do que são pequenos, médios e grandes produtores rurais. Alguns autores consideram a escala de produção para fazer esta desagregação, outros consideram a renda bruta anual e outros, a área total do imóvel. Na presente tese, considera-se como pequeno produtor aquele com área total de até 50 hectares (caso de NÉRIS, 2001, por exemplo). Isto permitirá comparar alguns resultados da pesquisa da SENAR com os do Censo Agropecuário do Brasil.

É importante ressaltar que a presente Tese considera uma amostra dos pequenos produtores de leite no Brasil, mas referente a 2021. Para efeito de comparação dos valores supracitados com o registrado no Censo Agropecuário 2017, tinham-se, neste último ano, que os estabelecimentos que produziam leite no Brasil ordenhavam, em média 10 vacas, e produziam 25 mil litros por ano. Segundo este Censo, os estabelecimentos que tinham área total de até 50 hectares representavam 74% do total dos que produziam leite (IBGE, 2017).

Adicionalmente, os dados da ATeG nos permitem realizar pesquisas que analisem os efeitos das emissões de gás metano (CH_4) provenientes da fermentação entérica das vacas em lactação – gás com maior contribuição nas emissões de GEE pelo setor agropecuário.

Diante do exposto previamente, a presente pesquisa tem por principais questionamentos: qual é o nível das eficiências técnica e ambiental das pequenas propriedades leiteiras no Brasil? As estimativas com formas funcionais diferentes, modelos distintos e agrupamento de dados em nível regional fornecem resultados diferentes de eficiências técnica e ambiental? Se sim, como essas eficiências encontram-se distribuídas entre as regiões brasileiras? Qual é a relação entre a eficiência ambiental, a eficiência técnica e a produção de leite?

Responder às perguntas mencionadas anteriormente é importante para elaborar políticas públicas visando o crescimento econômico e social da pecuária leiteira nas propriedades

brasileiras, e com responsabilidade ambiental. A presente pesquisa, além de gerar informações sobre o potencial que a produção de leite pode aumentar e sobre o melhor uso dos insumos produtivos, contribuirá no engrandecimento do conhecimento sobre a relação entre a produção de leite e o meio ambiente, e ajudará a fundamentar metas e propostas de políticas de mitigação da emissão dos GEEs e melhorias na produção de leite de cada região do Brasil.

1.1 Objetivos

O **objetivo geral** desta tese é estimar e analisar os níveis de eficiência técnica e ambiental dos pequenos produtores de leite no Brasil, em especial identificando os seus principais determinantes e de que modo a escala de produção e a eficiência técnica afetam a eficiência ambiental dos pequenos produtores nesta atividade.

Como existem diferentes formas funcionais para definir uma função de produção (entre as quais se destacam a Cobb-Douglas e a Translog) e diferentes métodos paramétricos de estimá-las (por exemplo, via a fronteira estocástica e a metafronteira) o trabalho seguirá duas etapas em seus cálculos, implicando em três objetivos específicos a serem alcançados.

Inicialmente, e compondo o primeiro objetivo específico, estimar-se-ão seis modelos para cálculos das eficiências técnica e ambiental da pecuária leiteira para o Brasil. Essas estimativas combinam as formas funcionais Cobb-Douglas e Translog com os modelos (abordagens) de: (a) uma única fronteira estocástica de produção, sem considerar diferenças entre as regiões brasileira; (b) uma única fronteira de produção, mas com *dummies* para considerar as regiões brasileiras; e (c) a metafronteira. Os resultados desses seis modelos serão comparados entre si quanto a suas semelhanças e diferenças e selecionar-se-á o que se julgar adequar melhor à realidade da pecuária leiteira conduzida por pequenos produtores no Brasil.

A partir dos cálculos de eficiência técnica e eficiência ambiental dos produtores analisados (a partir do modelo a ser selecionado) procurar-se-á avaliar a sua associação estatística, bem como com a escala de produção de cada produtor, fazendo uso, inicialmente, do coeficiente de correlação de Spearman e em seguida da Análise de Correspondência Múltipla (isto comporá o segundo objetivo específico da Tese).

Finalmente, o terceiro objetivo específico da tese é estimar uma regressão múltipla em que a eficiência ambiental (considerada como variável dependente) é determinada pela eficiência técnica e pela escala de produção de leite (a serem assumidas como variáveis independentes). Procurar-se-á com isto avaliar as propostas feitas pela FAO e *World Bank* sobre formas de reduzir a emissão de CH₄ pela pecuária bovina leiteira. Esta regressão será estimada

com microdados dos produtores, mas tomando-os agrupados para todo o Brasil e também os tomando agrupados por suas macrorregiões de localização.

Para alcançar os objetivos (geral e específicos) supradelimitados, microdados referentes às características pessoais e da produção de produtores atendidos pelo Programa de Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) do Senar, e referentes a 2021, serão utilizados para estimar, via fronteira estocástica de produção e via a metafronteira, a eficiência técnica e a eficiência ambiental.

A pressuposição que norteia o trabalho, e que será apreciada ao cumprir o primeiro objetivo supracitado, é que os níveis tecnológicos dos pequenos produtores de leite no Brasil são heterogêneos, variando, principalmente, entre as regiões brasileiras em que eles se localizam, e, por isso, a estimativa de uma única fronteira de produção para todo o Brasil, sem considerar a presença dessa heterogeneidade, pode gerar resultados viesados de eficiência técnica e da eficiência ambiental alcançados pelos pequenos pecuaristas de leite no Brasil e de sua associação estatística e econométrica. Assume-se também, que, ao invés de estimar fronteiras estocásticas para cada região, a metafronteira estocástica pode ser adotada para estimar as metaeficiências, pois ela considera as diferenças tecnológicas das propriedades localizadas em diferentes regiões brasileiras e permite a comparação das metaeficiências entre os produtores de leite.

1.2 Estrutura do trabalho

A presente tese encontra-se estruturada em seis capítulos, sendo o primeiro composto por esta Introdução. Em seguida, tem-se a revisão de literatura, mostrando o conhecimento sobre o assunto em epígrafe e a esperada contribuição da tese. No capítulo 3 há a análise do panorama da pecuária leiteira no Brasil e nas suas macrorregiões, a análise do sistema de assistência técnica e extensão rural no Brasil, e da relação entre a pecuária leiteira e o meio ambiente. No capítulo 4 tem-se o referencial teórico e metodológico utilizado na tese, em que se aborda a teoria da produção, os modelos de fronteira estocástica e de metafronteira estocástica, que serão utilizadas para calcular as eficiências técnica e ambiental. Para verificar a relação estatística entre ambas, empregar-se-á, inicialmente, o coeficiente de correlação de Spearman e em seguida a análise de correspondência múltipla. Se comprovada a relação estatística entre eficiência ambiental, eficiência técnica e escala de produção de leite, estimar-se-á uma regressão múltipla da eficiência ambiental em relação à eficiência técnica e à quantidade produzida de leite para os produtores agrupados tanto em nível de Brasil quanto de suas macrorregiões. O capítulo 5 contempla a análise descritiva da amostra de produtores de

leite a ser utilizada e os resultados e discussão da aplicação dos arcabouços teóricos e metodológicos apresentados no capítulo 4. Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões finais do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA SOBRE EFICIÊNCIA TÉCNICA E AMBIENTAL NAS PRODUÇÕES NACIONAL E INTERNACIONAL DE LEITE

Há muitos estudos que analisam a eficiência técnica e a ambiental de diferentes atividades, mas fazendo uso de distintos modelos e/ou métodos de estimação. Dentre esses estudos se destacam os relacionados à produção agropecuária, à produção industrial e à produção de energia. Nos estudos relacionados à agropecuária, a pecuária leiteira é considerada por ampla literatura que aborda eficiência técnica e econômica e, a partir da década de 1990, surgem os estudos que também consideraram os impactos ambientais desta atividade, analisando a sua eficiência ambiental.

Em nível internacional, estudos como os de Reinhard, Lovell e Thijssen (1999, 2002, 2000), Dayananda (2016), Le, Jeffrey e An (2020), Nin-Pratt (2013), Shortall e Barnes (2013) e Urdiales, Lansink e Wall (2016) – ver Quadro 1 – analisam a eficiência técnica e a ambiental da pecuária leiteira em diferentes países. Esses estudos utilizam diferentes modelos de estimação, por exemplo: Dayananda (2016) e Nin-Pratt (2013) realizam suas análises com múltiplos insumos e produtos; Reinhard, Lovell e Thijssen (2000) mensuram a eficiência ambiental com múltiplos insumos ambientais indesejáveis; Le, Jeffrey e An (2020) realizam uma análise multiproduto; e, Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) e Shortall e Barnes (2013) adotam o conceito de que a eficiência ambiental é razão entre o mínimo viável e o uso observado do insumo ambiental indesejado, dado os níveis tecnológico e de produção.

No Brasil (ver Quadro 2), as pesquisas desenvolvidas por Silva e Bragagnolo (2018) e Campos et al. (2018) analisam a eficiência técnica e a ambiental para a pecuária leiteira. Esses estudos utilizam metodologias diferentes para mensurar a eficiência. Silva e Bragagnolo (2018) usam uma técnica econométrica paramétrica: a análise de fronteira estocástica adaptada por Reinhard, Lovell e Thijssen (1999). Por outro lado, Campos et al. (2018) adotam a técnica não paramétrica: Análise Envoltória de Dados, juntamente com a regressão quantílica.

Testes de correlação entre a eficiência técnica e a ambiental também são realizados por alguns estudos com o objetivo de mostrar a relação entre elas. Reinhard, Lovell e Thijssen (1999), Dayananda (2016), Le, Jeffrey e An (2020) e Silva e Bragagnolo (2018) constatam em seus trabalhos que existe uma correlação positiva entre as eficiências para os estabelecimentos por eles analisados, ou seja, conforme aumenta o índice de eficiência técnica também há aumentos na eficiência ambiental.

Para aprofundar a análise sobre os determinantes da eficiência ambiental, alguns trabalhos buscam examinar os efeitos das características dos produtores de leite na eficiência ambiental. Reinhard, Lovell e Thijssen (2002) e Dayananda (2016) realizaram esta análise

utilizando três procedimentos diferentes, a saber: estimativas de máxima verossimilhança, regressão de mínimos quadrados ordinários e modelo de Tobit. Seguindo na mesma linha, Le, Jeffrey e An (2020) analisam os fatores que influenciam na eficiência ambiental somente por meio de estimativas de máxima verossimilhança. Urdiales, Lansink e Wall (2016), por sua vez, utilizam a análise envoltória de dados (DEA) para estimar a eficiência ambiental e a regressão truncada para analisar a influência das características e das atitudes socioeconômicas dos produtores na eficiência ambiental. Dentre as variáveis explicativas utilizadas por esses autores destacam-se: idade do produtor, nível educacional, tamanho do rebanho, ingestão de matéria seca, ração, experiência (anos de produção), esterco líquido, produção de leite, percentual da área em que são praticados os sistemas de pousio, queimada e rotação de culturas, percentual dos administradores dos estabelecimentos que são mulheres, capacidade dos tanques de leite, dentre outras.

Quadro 1 - Síntese dos trabalhos sobre análise da eficiência técnica e da ambiental na pecuária leiteira de outros países

Continua

Autor	Método empregado	Período analisado	Região	Eficiência analisada	Dados utilizados	Resultados para os estabelecimentos amostrados
Reinhard, Lovell e Thijssen (1999)	Método de fronteira estocástica adaptada	1991 a 1994	Holanda	Eficiência técnica e ambiental	<i>Dutch Farm Accountancy Data Network (FADN)</i>	Produtores são eficientes tecnicamente e ineficientes ambientalmente
Reinhard, Lovell e Thijssen (2000)	Método de fronteira estocástica e Análise Envoltória de Dados	1991 a 1994	Holanda	Eficiência técnica e ambiental	<i>Dutch Farm Accountancy Data Network (FADN)</i>	Produtores são eficientes tecnicamente e ineficientes ambientalmente
Reinhard, Lovell e Thijssen (2002)	Método de fronteira estocástica adaptada e modelo de dois estágios	1991 a 1994	Holanda	Eficiência técnica e ambiental	<i>Dutch Farm Accountancy Data Network (FADN)</i>	Produtores são eficientes tecnicamente e ineficientes ambientalmente
Moreira e Bravo-Ureta (2010)	Método estocástico de metafronteira – painel desbalanceado	1996/1997 a 2002/2003	Argentina, Chile e Uruguai	Eficiência técnica	Ministério da agricultura da Argentina, Chile e Uruguai	Produtores apresentam diferentes níveis de tecnologia, sendo os produtores da Argentina e Uruguai mais eficientes tecnicamente que os do Chile
Nin-Pratt (2013)	Função de distância direcional	2002 a 2007	142 países	Eficiência técnica e ambiental	<i>Food and Agriculture Organization</i>	Produtores apresentam altos níveis de eficiência técnica e ambiental
Shortall e Barnes (2013)	Análise Envoltória de Dados	2001/2002	Escócia	Eficiência técnica e ambiental	Dados primários	Produtores apresentam altos níveis de eficiência técnica e ambiental
Jiang e Sharp (2015)	Método de fronteira estocástica e de metafronteira	1998/99 a 2006/07	Ilhas do Norte e do Sul da Nova Zelândia	Eficiência técnica	<i>DairyNZ</i>	Produtores apresentam diferentes níveis de tecnologia, sendo que os produtores do Sul mais eficientes tecnicamente do que os do Norte
Dayananda (2016)	Função de distância estocástica orientada aos insumos	2010 a 2012	Ontário - Canadá	Eficiência técnica e ambiental	<i>Ontario Dairy Farmers Accounting Project (ODFAP)</i>	Os produtores são eficientes tecnicamente e ineficientes ambientalmente
Urdiales, Lansink e Wall (2016)	Análise Envoltória de Dados	2010	Astúrias – Espanha	Eficiência técnica e ambiental	Dados primários	Produtores apresentam baixos níveis de eficiência técnica e ambiental

Autor	Método empregado	Período analisado	Região	Eficiência analisada	Dados utilizados	Resultados para os estabelecimentos amostrados
Melo-Becerra, Antonio e Orozco-Gallo (2017)	Método estocástico de metafronteira	2011	Colômbia	Eficiência técnica	<i>Rural module of the quality-of-life survey</i>	Baixa eficiência técnica das propriedades analisadas
Alem et al. (2019)	Método estocástico de metafronteira	1992 a 2014	Noruega	Eficiência técnica	<i>Norwegian Institute of Bioeconomy Research (NIBIO)</i>	Produtores apresentam diferentes níveis de tecnologia, sendo que os produtores das cinco regiões da Noruega são eficientes tecnicamente
Le, Jeffrey e An (2020)	Função de distância hiperbólica combinada com a fronteira estocástica	1996 a 2016	Alberta- Canadá	Eficiência técnica e ambiental	<i>Dairy Cost Study</i>	Produtores apresentam altos níveis de eficiência técnica e ambiental
Cele, Hennessy e Thorne (2023)	Método estocástico de metafronteira	2010 a 2018	Irlanda	Eficiência técnica	<i>National Farm Survey (NFS) – Irish Teagasc</i>	Produtores apresentam diferentes níveis de tecnologia, sendo que os produtores das quatro regiões da Irlanda são eficientes tecnicamente
Latruffe et al. (2023)	Método de fronteira estocástica de classe latente (LCSFM) e de metafronteira estocástica	2015 a 2018	França, Irlanda e Áustria	Eficiência técnica	<i>Farm Accountancy Data Network (UE-RICA)</i>	Produtores apresentam diferentes níveis de tecnologia, sendo que os produtores dos três países apresentam eficiências altas. Propriedades em sistema intensivo apresentam eficiência média mais alta.

Fonte: Elaborada pela autora.

Conclusão

Quadro 2 - Síntese dos trabalhos sobre análise da eficiência técnica e ambiental na pecuária leiteira do Brasil

Continua

Autor	Método empregado	Período analisado	Região	Eficiência analisada	Dados utilizados	Resultados para os estabelecimentos amostrados
Ferreira Junior e Cunha (2004)	Método de fronteira estocástica	1996	Minas Gerais	Eficiência técnica	Dados primários – Sebrae e referentes a três sistemas de produção de leite e usando rebanho Zebu, Mestiço ou Europeu.	Produtores que atuam com sistema de produção de leite com gado Mestiço e Europeu são eficientes tecnicamente; Produtores que atuam com sistema de gado de produção de leite Zebu são ineficientes.
Dos Santos, Vieira e Baptista (2005)	Análise Envoltória de Dados	1999 a 2002	Microrregião de Viçosa-MG	Eficiência técnica	Dados primários	Produtores são ineficientes tecnicamente
Magalhães e Campos (2006)	Análise Envoltória de Dados	04/2004 a 07/2004	Sobral-CE	Eficiência técnica e de escala	Dados primários	Produtores são ineficientes tecnicamente
Gonçalves et al. (2008)	Análise Envoltória de Dados	2005	Minas Gerais	Eficiência técnica	Diagnóstico da Pecuária Leiteira no Estado de Minas Gerais – Federação da Agricultura e Pecuária do Estado de Minas Gerais	Produtores são ineficientes tecnicamente
De Sousa, Campos e Gomes (2012)	Análise Envoltória de Dados	2009	Goiás	Eficiência técnica	Diagnóstico da Cadeia Produtiva de Leite de Goiás - Federação de Agricultura e Pecuária de Goiás.	Produtores são ineficientes tecnicamente
Nascimento et al. (2012)	Método de fronteira estocástica	2005	Minas Gerais	Eficiência técnica	Projeto de Assistência Técnica EDUCAMPO	Produtores são ineficientes tecnicamente
Novo et al. (2013)	Análise Envoltória de Dados	2002 a 2008	São Paulo	Eficiência técnica	Dados programa “Balde Cheio”	Produtores são ineficientes tecnicamente

Autor	Método empregado	Período analisado	Região	Eficiência analisada	Dados utilizados	Resultados para os estabelecimentos amostrados
Brito (2016)	Método de fronteira estocástica e regressão quantílica	2006	Brasil	Eficiência técnica	Censo Agropecuário de 2006	Produtores são eficientes tecnicamente
Travassos et al. (2016)	Análise Envoltória de Dados	01/2010 a 08/2010	Zona da Mata – MG	Eficiência técnica	Dados primários coletados nos municípios de Muriaé e Leopoldina	Produtores são eficientes tecnicamente
Campos et al. (2018)	Análise de agrupamentos, análise envoltória de dados e regressão quantílica	2005	Minas Gerais	Eficiência ambiental	Diagnóstico da Pecuária Leiteira no Estado de Minas Gerais – Federação da Agricultura e Pecuária do Estado de Minas Gerais.	Produtores apresentam baixos níveis de eficiência ambiental
Silva e Bragagnolo (2018)	Método de fronteira estocástica adaptada	2016	Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba - MG	Eficiência técnica e ambiental	Dados do projeto Educampo/SEBRAE	Produtores são eficientes tecnicamente e ambientalmente
Mareth et al. (2019)	Análise Envoltória de Dados	2010	COREDE Alto Jacuí - RS	Eficiência técnica	Dados primários	Produtores são ineficientes tecnicamente

Fonte: Elaborada pela autora, sendo que, em parte, também já foi apreciado no trabalho de Almeida e Bacha (2021).

Conclusão

Ressalta-se que os Quadros 1 e 2 apresentam um resumo dos trabalhos selecionados para auxiliar na direção da presente pesquisa, mas o registrado nesses quadros não esgota toda a literatura nacional e internacional disponível sobre eficiência técnica e ambiental na pecuária leiteira.

Com relação aos resultados obtidos pelos artigos resumidos no Quadro 1, percebe-se que as pesquisas internacionais concluem, na sua maioria, que as fazendas leiteiras são eficientes tecnicamente, mas elas deixam a desejar quando relacionadas à eficiência ambiental. Entretanto, Le, Jeffrey e An (2020), Nin-Pratt (2013) e Shortall e Barnes (2013) indicam que os níveis médios de eficiência técnica e ambiental, para as fazendas leiteiras amostradas em seus estudos, são altos. Para Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) a eficiência técnica média foi alta (de 0,89), mas a eficiência ambiental média foi baixa (de 0,44). Seguindo a mesma tendência, Dayananda (2016) obteve como resultado eficiência técnica média de 0,82 e eficiência ambiental média de 0,30.

Aplicando a metafronteira estocástica na pecuária leiteira, Alem et al. (2019) encontram eficiência técnica média das regiões de 0,90 e metaeficiência média de 0,88. Jiang e Sharp (2015) relataram que a ET média obtida pela metafronteira foi de 0,69 e 0,82, respectivamente, para fazendas leiteiras das Ilhas Norte e Sul da Nova Zelândia. Na Irlanda, o estudo conduzido por Cele, Hennessy e Thorne (2023) identificou que as metaeficiências médias dos produtores de leite variam de 0,80 a 0,83.

Os estudos brasileiros, apresentados no Quadro 2, indicam predominância de produtores de leite ineficientes no Brasil. Apenas três trabalhos encontraram resultados que indicam os produtores de leite de suas amostras serem eficientes tecnicamente, sendo eles: Silva e Bragagnolo (2018), Travassos et al. (2016) e Brito (2016). Para Silva e Bragagnolo (2018) a constatação de relativa alta eficiência técnica (escore médio de 0,89) e ambiental (escore médio de 0,73) nos produtores é justificada por se considerar uma amostra de produtores que participam do projeto Educampo/SEBRAE, o qual fornece orientação técnica. Travassos et al. (2016) apontam que a eficiência técnica dos produtores de leite está atrelada à adoção de tecnologias na atividade, ao acesso à assistência técnica e à gestão de recursos. Campos et al. (2018) evidenciam que a eficiência técnica média foi de 0,68 e a eficiência ambiental média foi de 0,45. Para Brito (2016), analisando a produção de leite dos municípios brasileiros com base no Censo Agropecuário 2006, a eficiência técnica média foi elevada, de 0,88.

As aplicações da fronteira estocástica nas literaturas nacional e internacional para avaliar a pecuária, em grande maioria, faz uso de microdados referentes a produtores de leite. Campos et al. (2018), Nascimento et al. (2012) e Silva e Bragagnolo (2018) utilizam em seus

estudos microdados referentes a amostras de produtores de leite do estado de Minas Gerais. Os dados de Campos et al. (2018) foram obtidos do Diagnóstico da Pecuária Leiteira no Estado de Minas Gerais em 2005, conduzido pela FAEMG; os microdados usados por Silva e Bragagnolo (2018) e Nascimento et al. (2012) referem-se a produtores que receberam assistência gerencial e tecnológica do Projeto Educampo do Sebrae, para o ano de 2016 e de 2005, respectivamente.

Constata-se, a partir das informações colocadas nos Quadro 1 e 2, que dois métodos têm sido utilizados, majoritariamente, para mensurar a eficiência da bovinocultura leiteira. Elas são a Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA) e a Análise de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Analysis* - SFA). A Análise Envoltória de Dados é uma técnica não paramétrica, que não precisa de uma forma funcional determinada. A Análise de Fronteira Estocástica é uma técnica paramétrica em que o termo de erro se divide em duas partes: a aleatoriedade (choques aleatórios que fogem do controle do produtor) e a eficiência técnica.

Ambos os métodos (DEA e SFA) apresentam algumas desvantagens, por exemplo, na análise envoltória de dados é preciso fazer pressuposições sobre os retornos de escala, se são variáveis ou constantes, e na análise de fronteira estocástica faz-se necessário definir uma forma funcional do grupo de produção, como, por exemplo: Linear, Quadrática, Cobb-Douglas, Translog, dentre outras. Dentre as vantagens desses dois métodos, destaca-se que: a fronteira estocástica avalia o processo de produção envolvendo variáveis aleatórias (que estão presentes no caso da agropecuária, pois esta última sofre a influência de fatores externos não controlados pelos produtores rurais, como, por exemplo, o clima); a Análise Envoltória de Dados permite considerar o uso de vários insumos para elaborar vários produtos (o que é a realidade de vários estabelecimentos policultores do Brasil).

Reinhard, Lovell e Thijssen (2000) analisaram a eficiência técnica e a ambiental com os métodos DEA e SFA para a mesma amostra de fazendas leiteiras Holandesas. Segundo os autores, ambos os métodos estimam a eficiência ambiental, mas somente o método SFA tem capacidade de testar a hipótese de monotonicidade; e o método DEA apresenta ausência de um teste para monotonicidade, pois é uma técnica determinística que permite impor restrição de monotonicidade.

Na primeira década do século XXI, a metafronteira passou a ser incorporada nas análises de eficiência. O modelo de metafronteira considera a heterogeneidade da adoção de tecnologia por diferentes grupos de produtores e calcula o *gap* tecnológico - diferença entre a fronteira do grupo e a metafronteira (BATTESE; RAO; O'DONNELL, 2004; O'DONNELL; RAO; BATTESE, 2008). Nessa abordagem, a eficiência dos produtores é estimada inicialmente com

a fronteira estocástica de cada grupo e, posteriormente, verifica-se se os vários grupos compartilham da mesma tecnologia usada na produção.

Battese, Rao e O'Donnell (2004) e O'Donnell, Rao e Battese (2008) abordam a metafronteira como sendo estimada em duas fases: na primeira, esses autores usam o modelo de fronteira estocástica e, na segunda, a programação linear ou quadrática. Buscando manter as propriedades estatísticas da metafronteira, Huang, Huang e Liu (2014) apresentam a metafronteira estocástica (*stochastic metafrontier* - SMF), em que na segunda fase o modelo de fronteira estocástica utiliza-se de um novo procedimento de estimação para obter a metafronteira. Além disso, Huang, Huang e Liu (2014) incluem variáveis institucionais nos modelos para auxiliar na explicação do termo de eficiência e do *gap* tecnológico.

Dentre os estudos que utilizam a metafronteira estocástica para analisar a pecuária leiteira, destacam-se: Moreira e Bravo-Ureta (2010), que procuram identificar se Argentina, Chile e Uruguai compartilham da mesma tecnologia na pecuária leiteira; Jiang e Sharp (2015), que testam se os produtores de leite das Ilhas do Norte e do Sul da Nova Zelândia compartilham da mesma tecnologia; Alem et al. (2019), que analisam se as cinco regiões da Noruega compartilham da mesma tecnologia e se alcançam, ou não, os mesmos níveis de eficiência técnica; Cele, Hennessy e Thorne (2023), que estudaram a eficiência técnica de quatro regiões da Irlanda que não utilizam da mesma tecnologia; e Melo-Becerra e Orozco-Gallo (2017), que analisam a eficiência técnica das propriedades leiteira da Colômbia. No Brasil, identificaram-se alguns estudos que aplicaram a metafronteira estocástica introduzida por Huang, Huang e Liu (2014), sendo eles: Soares e Spolador (2019) em uma análise da eficiência técnica da produção de milho no estado de São Paulo; Silva e Morello (2021), identificando a relação entre eficiência e cooperativismo brasileiro; Carrer et. al (2022), estimando a eficiência técnica da produção de cana-de-açúcar no Brasil.

Estudos com a abordagem da metafronteira e que usam variáveis ambientais indesejadas (emissões, poluentes etc.) para analisar a agropecuária ainda são escassos, principalmente os que analisam a pecuária leiteira. Abdulai e Abdulai (2017), seguindo o método da metafronteira apresentada por O'Donnell, Rao e Battese (2008), analisam as eficiências técnica e ambiental para dois grupos de produtores de milho (praticantes e não praticantes de agricultura de conservação) da Zâmbia.

As formas funcionais mais utilizadas na literatura analisada, e apresentadas nos Quadros 1 e 2, são a Cobb-Douglas e a Translog. Elas são consideradas flexíveis, lineares nos parâmetros e parcimoniosas. A forma funcional Cobb-Douglas é mais restritiva em modelos com mais de dois insumos, apresenta menos parâmetros, possibilita que seja calculado retorno de escala e

pressupõe homogeneidade da função. A Translog é menos restritiva e tem mais parâmetros a serem estimados, entretanto, sua estimação pode incorrer, em alguns casos na violação da condição de monotonicidade⁷ (GREENE, 2008). Brito (2016) obteve seus resultados das fronteiras estocásticas utilizando as especificações Translog e Cobb-Douglas. Para o autor, a grande diferença está no fato de que algumas variáveis apresentam sinais trocados, o que pode ser explicado pela especificação da Translog possibilitar a análise das inter-relações dos insumos de produção.

As principais variáveis que foram utilizadas pelos estudos expostos nos Quadros 1 e 2 para estimar a fronteira estocástica de produção e obter os níveis de eficiência técnica são: produção de leite, número de vacas ordenhadas, despesas com alimentação (como ração, minerais, silagem e pastagens), despesas com mão de obra, despesas com medicamentos, cuidados veterinários, capital utilizado na produção (tais como as despesas com máquinas e equipamentos) e a área ocupada pela pecuária. Campos et al. (2018) e De Sousa, Campos e Gomes (2012), Lima Gonçalves et al. (2008) incorporam nas suas análises as variáveis valor da produção de leite e valor da venda de animais.

Como indicador ambiental indesejável, os estudos analisam, principalmente, as emissões de metano, óxido nitroso e CO₂ equivalente (metano, nitrogênio, óxido nitroso e, ou, dióxido de carbono). Para se obter as estimativas do indicador ambiental indesejado (também chamado de variável ambiental indesejável), algumas abordagens adotadas se destacam, sendo elas: o princípio do balanço de nutrientes adotado nos estudos de Campos et al. (2018), Nin-Pratt (2013) e Urdiales, Lansink e Wall (2016); algoritmos adaptados do modelo Holos, baseado nas metodologias *Tier 2* e *3* do IPCC, e utilizados por Le, Jeffrey e An (2020); e, abordagem *Tier 2* do IPCC usada pelos autores Dayananda (2016), Silva e Bragagnolo (2018) e Shortall e Barnes (2013). Diferente da maioria desses estudos, a presente pesquisa tem foco na emissão de metano (CH₄) obtida com base na metodologia *Tier 1*, a ser apresentada no próximo capítulo.

Além de analisarem as variáveis explicativas da fronteira estocástica de produção que se enquadram como sendo fatores terra, trabalho e capital, alguns estudos – como o de Brito (2016), Kumbhakar, Wang e Horncastle (2015), Nascimento et al. (2012) e Alem et al. (2019) – se propõem também a analisar os fatores que explicam a ineficiência técnica. Para os autores citados, assume-se que a ineficiência pode ter um comportamento heterocedástico. Por isso, ao se incluir variáveis referentes às características das propriedades, dos produtores e do ambiente, pode-se obter estimativas mais precisas. Os autores acima citados utilizam as seguintes

⁷ A função de produção é considerada monotônica quando possuir produto marginal não-negativo, ou seja, aumentos no insumo (X_i) ocasionam aumento no produto (Y_i), segundo Greene (2008).

variáveis como fatores explicativos da ineficiência: margem bruta das fazendas; capacidade dos tanques de leite; percentual de propriedades que receberam algum tipo de orientação técnica; nível educacional do fazendeiro; total de máquinas nas propriedades; percentual de propriedades que realizam irrigação; acesso ao crédito rural, dentre outras.

Na literatura pesquisada, as variáveis da função de produção (área, mão de obra, capital, suplementação e emissões) comumente apresentam sinais dos coeficientes similares. Percebeu-se que capital e suplementação apresentam impacto positivo para aumento da produção. Com relação às variáveis área total e mão de obra, alguns estudos encontraram sinal positivo e outros encontraram sinal negativo para os coeficientes a elas vinculados. Brito (2016) chegou à conclusão de que a área utilizada para a pecuária leva a perdas no valor da produção leiteira, recomendando a intensificação da atividade para se produzir mais leite por cada hectare. Para Dayananda (2016), Silva e Bragagnolo (2018) e Reinhard, Lovell e Thijssen (1999), a variável ambiental indesejada apresentou coeficiente positivo, indicando que para haver acréscimo na produção, em alguma medida, haverá aumento nas emissões de gases de efeito estufa.

Com relação aos fatores que impactam na ineficiência, foi identificado nos estudos analisados que a variável associada ao fator educacional apresentou sinal positivo, gerando aumento na ineficiência. Brito (2016) argumenta que o sinal positivo do coeficiente associado à variável educacional está atrelado ao custo de oportunidade alto em relação a se manter na pecuária leiteira. Brito (2016), Alem et al. (2019) e Cele, Hennessy e Thorne (2023) constataram que o coeficiente associado à variável orientação técnica recebida pelos produtores apresentou sinal negativo, o que faz o aumento da orientação técnica reduzir a ineficiência.

Não foi encontrado, na literatura revisada, estudo que compare a eficiência técnica dos produtores de leite entre as regiões brasileiras – a saber, Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste – e que considere a heterogeneidade regional das tecnologias adotadas pelos produtores. Os estudos nacionais sobre a eficiência técnica na produção de leite são direcionados, principalmente, para a região Sudeste, com destaque para o estado de Minas Gerais. Dos doze estudos selecionados para análise (Quadro 2), oito são para a região Sudeste, um para a região Sul, um para a região Nordeste e um para a região Centro-Oeste. Apenas o estudo de Brito (2016) sobre eficiência técnica foi encontrado e que analisa os produtores de leite do Brasil como um todo, mas ele não faz análise separada para as regiões do país e não considera a heterogeneidade regional presente na pecuária leiteira.

Como destacado acima, há várias abordagens para estimar as eficiências técnica e ambiental dos produtores de leite, e dentre eles destacam-se a fronteira estocástica e a metafronteira. Este último considera diferentes níveis de tecnologia entre grupos de

estabelecimentos produtores de leite, permitindo captar a heterogeneidade presente na pecuária leiteira brasileira e comparar os seus níveis de metaeficiência. Até onde foi possível constatar, não foi observado estudo que utilize a abordagem de fronteira estocástica e de metafronteira estocástica para estimar conjuntamente a eficiência técnica e ambiental das propriedades leiteiras assistidas pelo Programa ATeG do Senar. Além disso, estudos que analisam o impacto do nível de educação, idade e despesas com medicamentos do rebanho na ineficiência técnica e do acesso à assistência técnica e gerencial no *gap* tecnológico entre grupos de produtores ainda são incipientes.

Outros dois pontos a serem destacados na contribuição desta tese são: (a) que não foram encontrados estudos que analisem a metaeficiência técnica e ambiental dos produtores para as regiões brasileiras, de forma separada; e, (b) não foi observado estudo que utilize a variável ambiental indesejável na abordagem de metafronteira estocástica (*stochastic metafrontier - SMF*).

A identificação dos níveis de eficiência técnica e da ambiental das propriedades leiteiras para o Brasil e regiões poderá auxiliar no planejamento do setor lácteo (infraestrutura, inovação tecnológica, etc.) e no direcionamento de metas e propostas políticas de mitigação dos GEEs e de melhorias na produção específica para cada região do Brasil (por exemplo, via maior disponibilidade de recursos financeiros para o crédito rural e criação de programas de assistência técnica e defesa agropecuária específicos).

3. PECUÁRIA LEITEIRA E MEIO AMBIENTE

Este capítulo encontra-se dividido em quatro partes: o primeiro tópico (item 3.1) apresenta o panorama da pecuária bovina leiteira no Brasil; a segunda parte (item 3.2) aborda o sistema de assistência técnica e extensão rural no Brasil e sua ligação com a pecuária bovina; a terceira parte (item 3.3) retrata a relação entre a pecuária leiteira e o meio ambiente; e a quarta parte (item 3.4) trata da relação entre eficiência técnica e as emissões de gases geradores de efeito estufa, em especial por parte do rebanho bovino.

3.1 Panorama da pecuária leiteira no Brasil

A bovinocultura leiteira está presente na pequena, média e na grande propriedade agropecuária, sendo que a mesma vai desde a produção para subsistência até a produção em grande escala e para fins comerciais. A produção de leite proporciona remuneração mensal e permite, em muitos casos, que os membros das famílias realizem outras atividades, tanto no meio rural como no urbano (DALCIN et al., 2009; MONTOYA; PASQUAL; FINAMORE, 2014; WILKINSON, 1997).

Para ocorrer a produção de leite, faz-se necessário o emprego diário de mão de obra, não apenas na ordenha, mas também no cuidado diário com o rebanho (em especial no seu manejo e trato de sanidade), podendo ser necessária a participação da família, principalmente em pequenas propriedades, ou a contratação de funcionários. A produção leiteira com finalidade comercial está fortemente vinculada com a indústria processadora deste produto, definindo as chamadas bacias leiteiras. Entretanto, esta atividade enfrenta problemas com a adoção de tecnologias modernas por parte expressiva dos produtores (havendo grande heterogeneidade tecnológica entre eles) e as advindas de flutuações no preço (DALCIN et al., 2009; MONTOYA; PASQUAL; FINAMORE, 2014).

A pecuária leiteira no Brasil se tornou mais moderna e dinâmica a partir da década de 1970, quando algumas políticas agrícolas deram suporte para os produtores adquirirem animais, máquinas e equipamentos que permitiram maior capacidade de produção e outros insumos modernos (tais como defensivos, corretivos, adubos e novas cultivares de forrageiras, que resultaram em melhores pastagens para o gado). A partir do começo dos anos 1990, o setor leiteiro foi impactado pela abertura comercial e pela globalização das principais economias mundiais, as quais compeliram os produtores de leite bovino a buscarem aumento da eficiência técnica e econômica, permitindo-lhes redução de custos e obter, conseqüentemente, maior competitividade (JANK; GALAN, 1998; ZOCCAL; DE SOUZA; GOMES, 2005).

A partir da segunda metade da década de 1990, por meio de um novo aparato institucional, passaram a serem formuladas e implementadas políticas públicas específicas que auxiliam a agricultura familiar, provendo-a com assistência técnica, educação não formal e acesso ao crédito, e permitindo, assim, a geração de emprego, renda e diversificação de atividades (VEIGA, 2001).

Dentre as políticas, programas e normas criadas para o setor leiteiro, destacam-se: o programa Boas Práticas e Bem-estar Animal; Plano de Incentivo à Pecuária Bovina (criado no ano de 2014), dentro do qual há os programas Mais Leite e Mais Carne. Acerca de algumas normativas disciplinando a atividade em apreço, citam-se, por exemplo: a Portaria MAPA⁸ nº 56, do ano de 1999, a qual estabeleceu regras para a produção de vários tipos de leite; a Instrução Normativa MAPA nº 51, de 18 de setembro de 2002, que busca garantir a segurança alimentar e a qualidade do leite; a Instrução Normativa MAPA nº 62, do ano de 2011, que tem por objetivo estabelecer os requisitos que devem ser observados na produção, na identidade e na qualidade do leite tipo A; a Instrução Normativa MAPA⁹ nº 76, de 26 de novembro de 2018, que define identidade e características a três tipos de leite: o cru refrigerado, o pasteurizado e o pasteurizado tipo “A” – essa normativa indica limites de temperatura (para transporte e estocagem do leite), características sensoriais (coloração e odor), teor, acidez, dentre outras; a Instrução Normativa MAPA¹⁰ nº 77, de 26 de novembro de 2018, que define critérios e procedimentos para produção, transporte, armazenamento, conservação, seleção e recepção do leite cru em estabelecimentos com registro no serviço de inspeção (BRASIL, 2023b; ZOCCAL; DE SOUZA; GOMES, 2005).

Há uma grande heterogeneidade entre os estabelecimentos produtores de leite e presentes no território brasileiro. Os principais fatores determinantes de tal diversidade estão relacionados ao contexto social, à disponibilidade de recursos financeiros, à escolaridade, à qualificação profissional, ao tamanho da área da propriedade, que variam muito entre as regiões. Por exemplo, no Norte e no Centro-Oeste esses produtores possuem maiores áreas, enquanto no Nordeste e no Sul os produtores possuem menores áreas. Os produtores de leite exercem função importante nas regiões e na cadeia leiteira, pois eles demandam insumos, como também ofertam produtos para os demais segmentos da cadeia produtiva, o que, naturalmente, contribui para o desenvolvimento socioeconômico das regiões (TEDESCO, 1999; VEIGA, 2001).

⁸ Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil, em 2023 renomeado Ministério da Agricultura e Pecuária.

⁹ Esta Instrução Normativa (IN) sofreu algumas alterações pelas IN MAPA nº 58 de 2019 e IN MAPA nº 55 de 2020.

¹⁰ Esta Instrução Normativa (IN) sofreu algumas alterações pela IN MAPA nº 59 de 2019.

Conforme o Censo Agropecuário 2017 (ver Tabela 1), a produção de leite de vaca estava presente em 1.176.295 estabelecimentos agropecuários em 2017, e produziram-se 30,1 bilhões de litros de leite, sendo que houve a produtividade média de 2.621 litros/vaca/ano. As três regiões com maior número de estabelecimentos agropecuários que produziram leite, em 2017, foram Nordeste, Sudeste e Sul, com destaque para os estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia (IBGE, 2017).

Apesar da região Nordeste apresentar o maior número de estabelecimentos agropecuários que produziram leite (354.257, equivalente a 30,12% do total nacional) em 2017, os maiores níveis de produção e produtividade foram nas regiões Sudeste e Sul respectivamente (ver Tabela 1). Os estados com maior produtividade na pecuária bovina leiteira em 2017 foram Rio Grande do Sul (com 4.258 litros/vaca/ano), Santa Catarina (com 4.076 litros/vaca/ano) e Paraná (com 3.731 litros/vaca/ano). O estado de Minas Gerais é o que apresenta o maior rebanho de vacas ordenhadas, e o Amapá, o menor rebanho. A região Sudeste se destacou pela maior produção de leite (11,1 milhões de litros) e número de vacas ordenhadas (3,9 milhões de vacas), e a região Sul pela maior produtividade (4.022 litros/vaca/ano) em 2017 (IBGE, 2017).

Tabela 1 – Distribuição da pecuária brasileira de leite em 2017, por região do país

Regiões	Estabelecimentos Agropecuários (número)	Vacas ordenhadas (Cabeças)	Produção de leite (mil litros)	Produtividade (litros/vaca)
Norte	110.762	1.392.301	1.906.289	1.369
Nordeste	354.257	1.937.981	3.253.116	1.679
Sudeste	291.099	3.945.163	11.124.177	2.820
Sul	287.991	2.485.766	9.998.757	4.022
Centro-Oeste	132.186	1.745.577	3.873.940	2.219
Brasil	1.176.295	11.506.788	30.156.279	2.621

Fonte: Elaborada pela autora a partir dos dados do Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2017).

A produção brasileira de leite está presente em todo o território nacional, mas os principais *clusters* são as mesorregiões Noroeste do Rio Grande do Sul, Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba em Minas Gerais, Oeste Catarinense, Sul e Centro Goiano e o Leste Rondoniense (ANDRADE et al., 2021; IBGE, 2017). Na região Nordeste, a adoção de tecnologia e a gestão das propriedades fazem com que a produção e a produtividade de leite apresentassem um salto nos últimos anos, com destaque para a bacia leiteira formada pelos estados de Pernambuco, Alagoas e Sergipe (HOTT; ANDRADE; JUNIOR, 2022).

A pastagem é um dos principais insumos usados na pecuária leiteira no Brasil, em razão da predominância do sistema extensivo e do semiextensivo. Em regiões que apresentam pastagem degradada e sazonalidade na produção de capim (períodos de seca) a quantidade e a

qualidade da produção de leite são impactadas diretamente. As regiões Centro-Oeste e Nordeste apresentam áreas de pastagens com elevada degradação, as quais têm gerado menor produtividade e rentabilidade na atividade leiteira. Estima-se que o potencial de incremento anual na produção de leite é de 9,6 milhões de toneladas de leite por meio de melhorias no manejo de um milhão de hectares de pastagem (HOTT; ANDRADE; JUNIOR, 2022). Concomitante, pastagens bem manejadas são eficientes em fixar carbono, reduzindo a pegada de carbono da pecuária (EMBRAPA, 2023).

Algumas raças de animais, como vacas Gir Leiteiro, quando expostas a temperaturas elevadas intensificam o seu nível de estresse calórico, impactando negativamente a produção de leite e a reprodução dos animais. Regiões como Norte e Nordeste, após melhoramento genético e a entrada de bovinos da raça Zebu (tais como, vacas das raças Gir, Guzerá e Sindi), estão conseguindo incorporar animais mais resistentes e adaptados a ambientes quentes, elevando a produção das regiões (HOTT; ANDRADE; JUNIOR, 2022).

A bovinocultura leiteira está ligada de forma importante à geração de emprego e ao abastecimento do mercado interno, mas também ela exerce influência na permanência das famílias no campo, reduzindo o êxodo rural e a superpopulação na zona urbana (MESQUITA; MENDES, 2012; SITEMDA, 2020). Parte expressiva dos produtores de leite o produz de forma integrada com a indústria, ou seja, direcionando diretamente sua produção para as indústrias de processamento. A tendência da cadeia leiteira é de se concentrar em algumas regiões, principalmente para facilitar a logística de captação de leite pelas indústrias, visando obter economia de escala e ganhos de competitividade (HOTT; ANDRADE; JUNIOR, 2022).

3.2 Assistência Técnica e Extensão Rural no Brasil

O sistema de assistência técnica rural no Brasil foi criado visando estimular a modernização da agropecuária (na qual se inclui a pecuária bovina leiteira) à medida em que a assistência técnica rural poderia permitir ao produtor o acesso ao conhecimento e de como adotar modernas tecnologias e gerir melhor suas atividades agropecuárias escritórios (BACHA, 2018; PEIXOTO, 2008).

Em 1948, a Associação de Crédito e Assistência Rural (ACAR) foi criada em Minas Gerais, a qual tinha por objetivo fornecer crédito rural aos pequenos produtores e assistência técnica. Com o passar dos anos, outros estados foram criando as suas ACAR, e, frente a esse ambiente, foi criada a Associação Brasileira de Crédito e Assistência Rural (ABCAR), que em

1961 foi declarada entidade de utilidade pública¹¹. Após a criação do Sistema Nacional de Crédito Rural, em 1965, as ACARs pararam de prestar serviço de contratação de crédito e foram estatizadas, transformando-se, em grande parte, nas Empresas de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATERs), que passaram a ser coordenadas pela Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMBRATER) ver, por exemplo, Bacha (2018).

O sistema EMBRATER investiu em quantitativo de pessoas, descuidando da qualidade do serviço. Com a redução de subsídios a várias políticas agrícolas e diante da necessidade de ajustes estruturais na economia brasileira a partir de fins dos anos 1980, várias políticas federais passaram por reformas, redução e/ou realocação dos recursos, dentre elas a Assistência técnica e extensão rural (ATER), ver Bacha (2018).

Diante da política desestatizante do começo de 1990, a Embrater foi extinta¹². Alguns estados transferiram aos municípios a responsabilidade de manutenção física dos escritórios das EMATERs, e, em alguns casos, houve o fechamento de escritórios (BACHA, 2018; PEIXOTO, 2008).

Nos anos 2000 foi proposta a Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural (PNATER), instituída formalmente pela Lei nº 12.188 de 11/01/2010. A PNATER constitui-se em um conjunto de programas, ações de capacitações e financiamentos educativos geridos pela Agência Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural (ANATER)¹³.

Mesmo com a criação de novas entidades de assistência técnica e extensão rural, os gastos federais com este tipo de atividade permaneceram reduzidos nos anos 2000, quando comparados aos das décadas anteriores, fazendo com que produtores rurais brasileiros reclamassem que a ATER era insuficiente e, em muitas regiões, inexistente. Peixoto (2008) destaca que, em muitas regiões do Brasil, o acesso aos serviços de assistência técnica e extensão rural depende do apoio do Estado, o qual apresentava incapacidade financeira e gerencial e morosidade na sua provisão desde a década de 1990. Segundo Bacha (2018, p. 136) “[...] os gastos federais com promoção e extensão rural passaram de 20,8% do total de gastos anuais da União com a agropecuária no quinquênio 1980 a 1984, para 2,94% no quinquênio 2000 a 2004”.

Conforme os dados do Censo Agropecuário de 2017, dos mais de 5 milhões de estabelecimentos agropecuários existentes no Brasil, apenas 20,2% receberam algum tipo de

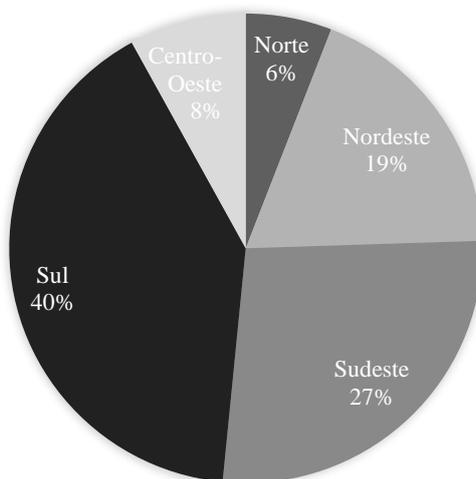
¹¹ Decreto nº 50.622, de 18 de maio de 1961, declara de utilidade pública a Associação Brasileira de Crédito e Assistência Rural (ABCAR) e suas filiadas.

¹² Decreto nº 242, de 25 de outubro de 1991, declara a extinção da Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMBRATER).

¹³ Lei nº 12.897 de 2013 autoriza o Poder Executivo a instituir a ANATER e o Decreto nº 8.252 de 2014 institui o serviço social autônomo denominado Agência Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural (ANATER).

orientação técnica (cerca de 1,0 milhão de estabelecimentos). A maioria desses estabelecimentos que receberam orientação técnica (Figura 1) estavam concentrados nas regiões Sul (40%) e Sudeste (27% do total). Na região Nordeste se encontravam 46% dos estabelecimentos agropecuários do Brasil (2,3 milhões de estabelecimentos), mas apenas 190 mil estabelecimentos deles receberam orientação técnica em 2017 (19% do total de estabelecimentos do Brasil que receberam orientação), segundo IBGE (2017). Esses dados evidenciam como a Assistência Técnica Rural não se encontra equitativamente distribuída no território brasileiro e isto pode gerar heterogeneidade no uso de modernas tecnologias entre os produtores dedicados à mesma atividade (como a pecuária bovina leiteira, por exemplo).

Figura 1 - Distribuição percentual, entre as regiões brasileiras, dos estabelecimentos agropecuários que tiveram orientação técnica em 2017



Fonte: Elaborada pela autora a partir dos dados dos Censos Agropecuários 2017 (IBGE, 2017).

O setor público respondia por menos de 1/3 da orientação técnica recebida na agropecuária em 2017. Nesse ano, apenas 33% dos estabelecimentos agropecuários brasileiros que declararam ter recebido orientação técnica alegou a mesma ser oriunda do governo (federal, estadual ou municipal). Os outros 77% de estabelecimentos que receberam orientação técnica alegaram a mesma ter diferentes origens, tais como: contratação própria, via cooperativas, via empresas integradoras, via empresas privadas, via ONGs, via Sistema S, principalmente (IBGE, 2017).

Diferentes atores passaram a ofertar e firmar parcerias (público-privados) de serviços de assistência técnica aos produtores rurais. Conforme Peixoto (2014), agentes privados assumiram as atividades de assistência técnica, tais como as revendas de insumos agropecuários, as empresas privadas de assistência técnica, as agroindústrias, as indústrias de

insumos, máquinas e de equipamentos. Esses agentes proporcionam informações especializadas e alinhadas com as demandas dos produtores, gerando modernização das cadeias produtivas e algumas vantagens competitivas aos produtores assistidos. No caso da bovinocultura, tem-se como exemplo de programas de transferência de tecnologia o Programa Balde Cheio (parceria entre Embrapa e Sebrae), o Programa de Assistência Técnica e Gerencial (ATeG), uma parceria do Mapa e do Sistema CNA/Senar, e o Projeto Educampo (Sebrae).

Para o funcionamento da Pnater são necessárias entidades executoras que prestem o serviço de ATER. Um caso de parceria para prestação de assistência técnica é o Programa Agronordeste¹⁴. Em 2019 foi anunciado o convênio entre a ANATER e o SENAR (parceria MAPA e Sistema CNA/Senar) para ofertar a Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) às propriedades rurais dos estados do Nordeste e do norte de Minas Gerais, objetivando melhorar a gestão e aumentar a produtividade e lucratividade da propriedade agropecuária atendida (DIESEL et al., 2021; SENAR, 2023).

A transferência de tecnologia através da assistência técnica ainda se faz necessária na produção de leite, pois ela ainda é uma atividade que requer evolução tecnológica e de gestão em várias partes do Brasil. Para Faria (2015) há algumas dificuldades no que tange à transferência de tecnologia, como resistência de alguns produtores e a busca por resultados imediatos. No entanto, o autor reconhece a ocorrência de mudanças importantes ao longo dos últimos anos e que foram incorporadas na pecuária leiteira via a assistência técnica e extensão, por exemplo: o uso da cana-de-açúcar para suplementação alimentar dos animais; a seleção das melhores vacas dada sua curva de lactação¹⁵; e, a adubação de pastagens (FARIA, 2015).

Em certas condições, é possível identificar que o acesso ao conhecimento de como implementar tecnologias e gerir suas atividades pode permitir aos produtores de leite aumentos de lucratividade, a melhor gestão dos insumos (aumentando sua eficiência técnica) e a obtenção de maior competitividade (VILELA et al., 2016). No entanto, ainda se fazem necessários novos estudos que analisem o impacto das iniciativas de assistência técnica e extensão rural.

A presente tese propõe-se a trazer uma avaliação e análise da eficiência técnica e ambiental dos produtores de leite assistidos pelo Programa de Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR). O programa é um exemplo de transferência de conhecimento e tecnologia e de convênio público-privada (Anater e Senar).

¹⁴ As Portarias nº 164 e nº 165 de 2019, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), tratam do Plano de Ação para o Nordeste – Nordeste. Essas portarias objetivam apoiar a organização das cadeias agropecuárias, ampliar a diversificação da comercialização e aumentar a eficiência produtiva (BRASIL, 2023b).

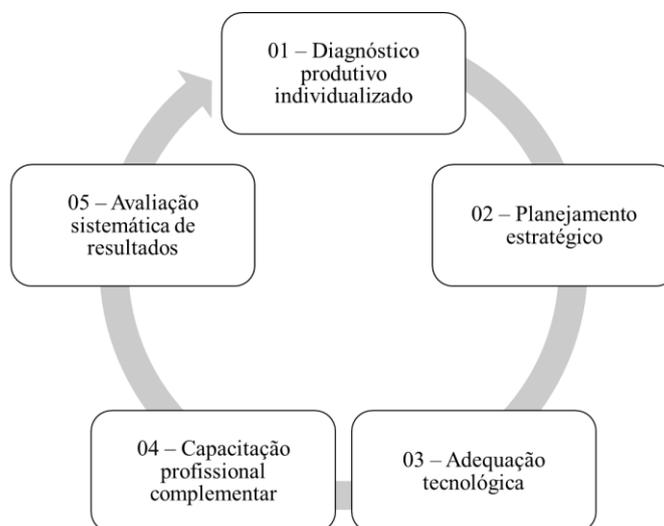
¹⁵ O quanto uma vaca varia a sua produção de leite em função da duração da lactação.

O Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR) presta Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) a fim de suprir com a lacuna de serviços públicos de assistência técnica e extensão rural ofertados no Brasil. A Assistência Técnica e Gerencial do Senar, criada em 2013, é um serviço gratuito, e tem como foco a geração de renda, a melhoria da produção e a gestão rural em formato educacional. Ela está em conformidade com a Lei nº 12.188/2010, a qual define assistência técnica e extensão rural como sendo

“[...] serviço de educação não formal, de caráter continuado, no meio rural, que promove processos de gestão, produção, beneficiamento e comercialização das atividades e dos serviços agropecuários e não agropecuários, inclusive das atividades agroextrativistas, florestais e artesanais” (BRASIL, 2010).

O serviço da ATeG/Senar consiste no acompanhamento, de produtores selecionados, por um técnico de campo por 24 meses, sendo que esse técnico aplica uma metodologia fundamentada na realidade de cada propriedade, a qual é dividida em cinco ações (ver Figura 2) e é focada em uma atividade produtiva (SENAR, 2023).

Figura 2 - Fluxograma da metodologia aplicada pela Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) do Senar



Fonte: Elaborada com base em Senar (2023).

A ATeG atende mais de 31 cadeias produtivas, sendo que a bovinocultura de leite é a que tem maior representatividade. Os principais projetos e programas nacionais, além dos regionais, que executaram a ATeG em 2021 foram: AgroNordeste, FIP Paisagens Rurais, Incentivo ATeG, SuperAção Brumadinho, Do Rural à Mesa, ATeG Agroindústria Artesanal e Mapa Leite. Durante os anos de 2014 e 2021 mais de 194 mil propriedades foram cadastradas

no Sistema de Monitoramento da ATeG (SISATeG) e 1,5 milhão de visitas foram realizadas (SENAR, 2022b).

O serviço de ATeG do Senar busca implementar um modelo de operação e gestão das propriedades rurais, envolvendo o processo produtivo e a gestão do negócio. Por meio da assistência técnica, os produtores passam a ter informações sobre novas tecnologias, pesquisas e conhecimentos importantes para o aprimoramento de suas atividades e que sejam apropriados ao contexto de cada propriedade (SENAR, 2022a).

3.3 Relação entre a pecuária leiteira e o meio ambiente

O agronegócio brasileiro tem se destacado, no mínimo, na produção de alimentos, na geração de emprego, pela sua importância em gerar saldo positivo da balança comercial e na sua representatividade para o PIB Nacional. Em específico, a necessidade de crescimento da produção de alimentos tende a continuar nos próximos anos, pois as estimativas da FAO e do Banco Mundial apontam para o crescimento da população mundial. Entretanto, a produção de alimentos de origem vegetal e animal inclui a geração de fenômenos ou resíduos indesejáveis, tais como: as emissões antrópicas de gases de efeito estufa e a degradação dos recursos naturais, destacando o desmatamento.

Os gases de efeito estufa (GEE), em determinada concentração, são essenciais para a manutenção da vida na terra, devido a sua propriedade de bloquear parte da radiação infravermelha oriunda do sol. Entretanto, a elevação nas emissões de gases oriundos de atividades antrópicas – por exemplo, os gerados pela agricultura e pela pecuária – tem gerado um desequilíbrio na atmosfera e ampliado a incidência da radiação solar. Isso causa o aumento das temperaturas médias globais, secas ou estiagens prolongadas e/ou elevação das chuvas ácidas. Portanto, o setor agropecuário tem contribuído para a elevação das emissões de GEE, como também o setor agropecuário tem sido afetado pelo efeito estufa, pois a produção agropecuária é altamente dependente da temperatura, da pluviosidade e da radiação solar (LIMA, 2002).

Os gases de efeito estufa provenientes de atividades antrópicas na biosfera, e apresentados pelos relatórios do IPCC e do MCTI, são: o dióxido de carbono (CO₂), os hidrofluorcarbonetos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs), o hexafluoreto de enxofre (SF₆), o óxido nitroso (N₂O) e o metano (CH₄). O setor agropecuário é uma das maiores fontes de emissão dos gases CH₄ e N₂O, tendo sido responsável em 2020 por 62,5% e 32% dessas emissões, respectivamente, no Brasil (BRASIL, 2022). As emissões do gás metano (CH₄) acontecem, principalmente, no processo de fermentação entérica dos herbívoros ruminantes

(ovinos, caprinos, bovinos e bubalinos) e não ruminantes (cavalos, mulas, asnos e suínos) e no manejo de dejetos de animais (ALBANEZ; ALBANEZ, 2014).

A partir da série histórica das emissões de gases de efeito estufa do Brasil - apresentada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), desde 2017 - observa-se a tendência de aumento dessas emissões, sendo que as emissões totais (de todos os gases citados no parágrafo anterior) em 2020 foram 13,7% superiores às emissões ocorridas em 2016. Conforme Brasil (2022), as emissões são distintas segundo os setores econômicos. Em 2020, o setor agropecuário foi responsável por 28,5% das emissões de dióxido de carbono equivalente. Esse percentual do setor agropecuário é superior aos setores de energia (responsável por 23,2% das emissões no Brasil), processos industriais e uso de produtos (responsável por 6,1%) e tratamento de resíduos (responsável por 4,2% das emissões feitas no Brasil). Mas a agropecuária fica abaixo do setor do uso da terra, mudança de uso da terra e florestas¹⁶ (responsável por 38% das emissões citadas).

O setor agropecuário contabilizou 477.670,5 Gg de CO₂eq (gigagramas de dióxido de carbono equivalente) de emissões em 2020, resultado que foi 1,9% menor que o contabilizado em 2016 (quando foi de 487.170 Gg de CO₂eq). Essas emissões estão relacionadas com o tamanho do rebanho bovino, com a quantidade e a qualidade da produção agrícola e com os tipos de fertilizantes usados no manejo do solo. Lembrando que o Brasil apresenta elevada extensão de terras disponíveis para a agricultura e pecuária. Com relação aos subsetores, a fermentação entérica apresenta a maior contribuição (57%) do total das emissões de CO₂eq feitas pela agropecuária no ano de 2020, a qual é seguida por solos manejados – que contabiliza, principalmente, as emissões pela adição de fertilizantes (sintéticos e orgânicos) ao solo (31,0%), manejo de dejetos (4,8%), calagem – emissões relacionadas ao consumo de calcário para fins agrícolas (4,5%), cultivo de arroz (1,7%), aplicação de ureia (0,9%), e queima de resíduos agrícolas (0,1%), de acordo com Brasil (2022).

A fermentação entérica é um processo que depende da quantidade e da qualidade do alimento ingerido pelo animal, da espécie do animal, da digestibilidade e do sistema de criação do animal (BERNDT et al., 2015). Como ressaltado acima, em 2020, a fermentação entérica correspondeu, em termos de CO₂eq, a 57% das emissões do setor agropecuário. Segundo Brasil (2022), esse elevado percentual de participação é proveniente, principalmente, dos bovinos (96,8%), com destaque para a pecuária de corte (88,4%) e de leite (8,4%).

¹⁶ É considerado nas estimativas de uso da terra, mudança de uso da terra e florestas a conversão do uso e cobertura da terra para um uso antrópico (por exemplo agricultura, pastagem, área urbana, reservatório ou mineração), associada ao desmatamento (queima da vegetação natural) e aos produtos florestais madeireiros (BRASIL, 2022).

A pecuária leiteira brasileira tem contribuído diretamente para a emissão do gás metano (CH₄) gerado pelo processo de fermentação entérica. Isso se deve à heterogeneidade presente no país, tanto pelo tipo de produtor quanto pelas características geográficas do país, o que dificulta a adoção de tecnologias que permitam ter vacas com índices altos de lactação (FAO, 2018; VILELA et al., 2016). O rebanho leiteiro nacional, de acordo com Berndt et al. (2015), é caracterizado por um gado mestiço, havendo as raças guzerá, nelore, jersey, gir, holandesa e os cruzamentos entre raças, como girolanda.

Um lado positivo no cenário discutido acima é que as emissões brasileiras de CH₄, oriundas da fermentação entérica do gado leiteiro, e estimadas pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), apresentaram redução de 26% entre 2006 e 2021. Os estados que se destacaram nesta redução foram: Mato Grosso do Sul (70% a menos em 2021 em relação ao que emitiu em 2006), Acre (-68%), Rondônia (-56%) e Piauí (-49%). No entanto, nesse mesmo período de 2006 a 2021, alguns estados apresentaram crescimento nas emissões de CH₄ por parte de sua pecuária bovina leiteira, sendo eles: Alagoas (alta de 59%), Paraíba (+36%) e Ceará (+28%), segundo SEEG (2023). Para Berndt et al. (2015), os estados do Nordeste, com destaque para a Paraíba, apresentam a maior parte do seu rebanho leiteiro com mistura de raças. Os estados da região Sul, por sua vez, apresentam predominância do emprego da raça holandesa no rebanho leiteiro. A raça holandesa apresenta elevado potencial de produtividade (aproximadamente 6.000 litros/vaca/ano), o que pode ser considerado um fator redutor das emissões de metano por litro de leite.

A região Sudeste apresentou o maior rebanho de vacas ordenhadas e a maior produção de leite em 2017 (IBGE, 2017), sendo a região com os maiores níveis de emissão de gás metano. Os pecuaristas dessa região usam três sistemas de produção: o extensivo, o semiextensivo ou o intensivo. Minas Gerais é o estado com o maior rebanho leiteiro, com a maior produção de leite e com os maiores níveis de emissão de metano oriundo da pecuária bovina leiteira no Brasil. A falta de ganhos de produtividade em parte da pecuária em Minas Gerais pode ser destacada como fator que aumenta as emissões de gás metano por litro de leite.

3.4 Relação entre eficiência técnica da pecuária leiteira e emissões do gás metano

Um dos maiores desafios da bovinocultura leiteira no Brasil é se tornar sustentável. A eficiência na produção de leite pode reduzir as emissões, pois, produtores que conhecem o seu processo produtivo e buscam constantemente obter ganhos de produtividade, tendem a emitir menores proporções de GEEs por litro de leite produzido. O relatório da US EPA, Hogan (1993) aponta o caso da intensificação (com melhoria da eficiência técnica) da criação do rebanho

bovino leiteiro dos Estados Unidos (maior produtor mundial de leite), que contribuiu na mitigação dos GEEs e no crescimento econômico dessa atividade.

Uma pecuária leiteira sustentável ambientalmente pode ser obtida através da mitigação das emissões de GEEs, entretanto, essa redução pode conduzir a um *trade-off* ou a uma sinergia (DRIESSEN; HILLEBRAND, 2002; GALDEANO-GÓMEZ; CÉSPEDES-LORENTE, 2008). A premissa do *trade-off* foi tratada até a década de 1980 como a única solução para a redução dos danos ambientais, em que elevadas taxas de crescimento econômico seriam obtidas apenas via a extração dos recursos escassos e pelo seu impacto negativo no meio ambiente.

Com o relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (*World Commission on Environment and Development – WCED*), conhecido como Relatório *Brundtland*, e pesquisas realizadas pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), *World Bank* e *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), surgiu a ideia de produção sustentável, com foco na premissa de que haveria sinergia entre a produção eficiente e os impactos ambientais. Sendo que os ganhos de eficiência na pecuária são destacados como redutores das emissões de metano por litro de leite (FAO, 2018).

Com a pretensão de analisar as eficiências técnica e ambiental dos produtores brasileiros de leite utilizar-se-ão as estimativas do CH₄ emitidos por seus rebanhos leiteiros. Essas estimativas podem ser apresentadas pela métrica do gás, ou seja, sua unidade de massa ou em gigagramas de dióxido de carbono equivalente (Gg CO₂eq), em que ocorre a conversão da emissão de gás de efeito estufa. Dada a grande extensão territorial do Brasil e a heterogeneidade tecnológica entre os produtores (que possuem diferentes graus de especialização na atividade), estudos sobre a mensuração das emissões de metano ainda são incipientes (BRASIL, 2016; EMBRAPA, 2023). Dentre as abordagens mais usadas para mensuração, nacionalmente e internacionalmente, têm-se o Ciclo de Vida e três métodos apresentados nas diretrizes revisadas de 2006 do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*): *Tier 1*, *Tier 2* e *Tier 3*.

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método capaz de estimar as emissões diretas e indiretas do processo de produção de um determinado produto. No caso da produção leiteira, a abordagem ACV acompanha toda a cadeia de produção de lácteos, fornecendo informações sobre as fases críticas do processo e sobre melhorias que podem ser implementadas ao longo do tempo. Esse método requer dados sobre a alimentação dos animais, uso de energia e terra, produção dos insumos (fertilizantes, pesticidas, diesel), transporte, coprodutos, dentre outros – ver Cederberg e Mattsson (2000) e Seó et al. (2017).

O método *Tier 1*, apresentado nos relatórios do IPCC e utilizado nas estimativas da FAO, é uma aproximação simplificada que utiliza fatores de emissão previamente escolhidos de outros estudos. Ele é considerado suficiente para mensurar as emissões da maioria dos tipos de animais (por exemplo, bovinos, equinos e ovinos). O método *Tier 2* apresenta uma abordagem mais complexa e requer, para seu cálculo, informações específicas sobre os animais e as práticas de manejo. Esse método é o mais indicado para mensurar as emissões dos países com grandes rebanhos de gado, pois as características do gado variam bastante. O método *Tier 3* é mais complexo e necessita de mais informações para a sua mensuração. Ele fornece estimativas apropriadas para cada país, obtidas por meio de desenvolvimento de modelos sofisticados (IPCC, 2019).

Algumas informações são necessárias para realizar a estimação da emissão de gás metano originária da fermentação entérica usando os métodos *Tier 2* e *Tier 3*, tais como: teor de gordura, taxa de prenhes, digestibilidade, consumo médio de alimento, composição da dieta dos animais, peso vivo do animal e variação sazonal (IPCC, 2019). Mas essas informações não estão disponíveis no banco de dados fornecido pela ATeG-Senar a ser considerado na presente tese.

O método *Tier 1* apresenta algumas limitações e está sujeito a incertezas nas suas estimativas, mas, dada a ausência de dados e de recursos apropriados para uma outra análise possivelmente mais acurada das emissões de CH₄ pela pecuária bovina leiteira a nível nacional, aquele será utilizado nesta pesquisa. À medida que novas informações estejam disponíveis, futuros estudos poderão realizar o aprofundamento e cálculos das emissões de CH₄ pela pecuária bovina do Brasil e usando os métodos *Tier 2* e *Tier 3*.

4. REFERENCIAIS TEÓRICO E METODOLÓGICO

Este capítulo compõe-se de quatro itens. Inicialmente, é exposta a teoria sobre a função de produção, em que se discute a teoria da produção, o conceito de metaprodução e as eficiências técnica e ambiental. O segundo tópico aborda os modelos de estimação da fronteira e da metafronteira estocástica e que serão utilizados para mensurar os níveis de eficiência técnica e ambiental das propriedades leiteiras do Brasil. No terceiro tópico tem-se a descrição das análises complementares realizadas: o teste de correlação de Spearman, a análise de correspondência múltipla e a regressão múltipla, a serem utilizadas para mostrar a relação entre as eficiências técnica e ambiental a serem estimadas. O quarto tópico deste capítulo apresenta as variáveis e a fonte de dados utilizadas no presente estudo, e a construção da variável ambiental.

4.1 Teoria sobre a função da produção

A função de produção é uma construção abstrata que mostra como insumos (dentro dos quais se incluem mão de obra, capital, terra) são combinados de diferentes maneiras (seguindo diferentes tecnologias) de modo a gerar bens e serviços. Para que ocorra o processo de produção, aplica-se a tecnologia para transformar os insumos em produtos. Por isso, a função de produção está relacionada com as possibilidades de combinações dos insumos disponíveis (os *inputs*), dado um determinado estado da tecnologia, para ser gerado um nível de produção, os *outputs* (GREENE, 2008).

O uso da combinação ótima dos insumos faz com que a firma seja considerada eficiente, visto que ela estará produzindo o máximo de produto a partir de uma dada quantidade de insumos (COELLI; RAO; BATTESE, 1998). Se a produção for menor que o nível máximo atingível, a firma não estará na fronteira de produção devido a operar com ineficiência técnica (KUMBHAKAR; WANG; HORNCastle, 2015). A função de produção tradicional assume que as firmas operam utilizando uma mesma tecnologia. Mas, a realidade é que as firmas atuam com diferentes tecnologias, e neste caso não é indicado que comparações dos níveis de eficiência das propriedades sejam realizadas (BATTESE; RAO; O'DONNELL, 2004).

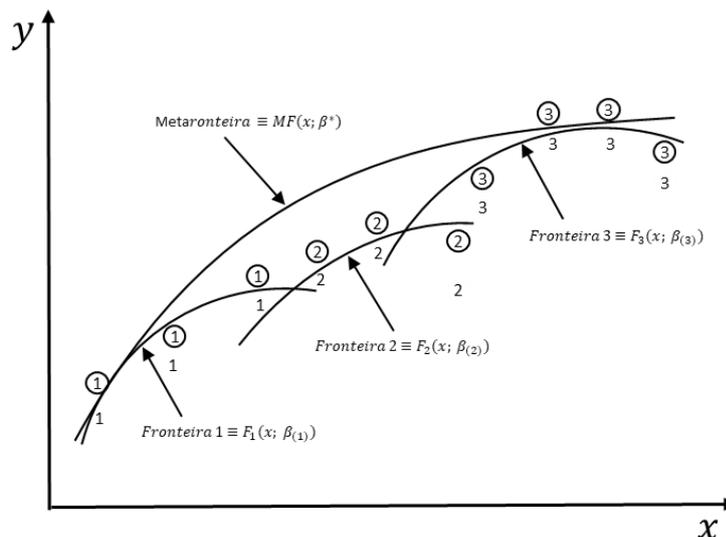
Hayami (1969) e Hayami e Ruttan (1970) introduzem o conceito da função metaprodução, que é uma envolvente de funções de produção de diferentes grupos de produtores que apresentam potencial de acesso à mesma tecnologia. Devido às características específicas da região, do clima, de regulamentação, da renda e do acesso aos recursos de produção, os produtores podem escolher um conjunto específico de tecnologias que não

represente o melhor, criando um *gap* em relação ao melhor conjunto de tecnologia disponível no mercado.

Os conjuntos de tecnologias utilizados pelos produtores, conforme suas características, formam grupos que compartilham de uma mesma fronteira, chamada fronteira específica do grupo (que podem ser os grupos de produtores das diferentes macrorregiões brasileiras), que indica o máximo que um produtor pode produzir dados os insumos e a tecnologia existente. Conforme Battese, Rao e O'Donnell (2004, p. 93), as fronteiras individuais dos grupos (que apresentam diferentes pacotes tecnológicos) formam a metafronteira de produção, que é considerada uma função suave das fronteiras específicas dos grupos e está relacionada ao conceito de metaprodução apresentado Hayami e Ruttan (1970).

A Figura 3 ilustra as fronteiras individuais de produção (Fronteira 1, Fronteira 2, Fronteira 3..., que, no presente trabalho, são as fronteiras estocásticas para os grupos de produtores de cada macrorregião brasileira) e a metafronteira (uma espécie de envoltória das fronteiras específicas de cada região). Os valores não circulados são os observados, os quais formam as fronteiras específicas de cada grupo, e os valores nos círculos correspondem aos resultados da fronteira estocástica, os não observados. A função metafronteira possui valores superiores aos associados aos modelos de fronteira individuais para os diferentes grupos de produtores. Entretanto, alguns valores de produção da fronteira do grupo podem exceder aos valores de produção obtidos na metafronteira, por exemplo, os produtores do grupo 3, que apresentam valores nos círculos acima da metafronteira (BATTESE; RAO; O'DONNELL, 2004, p. 94).

Figura 3 - Modelo de função metafronteira



Fonte: Elaborada pela autora com base em Battese, Rao e O'Donnell (2004, p. 93).

As funções de fronteira e a metafronteira podem ser mensuradas por representações paramétricas e não paramétricas. Considerando a abordagem paramétrica, existem algumas formas funcionais que apresentam propriedades específicas no momento de relacionar os *inputs* e *outputs*, tais como: a Linear; a Cobb-Douglas; a Quadrática; a Quadrática Normalizada; a Translog; a Leontief Generalizada; dentre outras (COELLI; RAO; BATTESE, 1998).

Considerando uma das formas funcionais (por exemplo, Translog ou Cobb-Douglas) para estimar a fronteira e a metafronteira estocástica, busca-se mensurar a eficiência dos produtores, que pode ser caracterizada como técnica e/ou econômica, com duas orientações: insumos-orientados e produto-orientados. A eficiência econômica pode se referir à produção constante com menor custo (insumo-orientado), ou à elevação na produção com o mesmo custo (produto-orientado). De forma semelhante, a eficiência técnica pode se referir à redução dos insumos permanecendo a produção constante (insumo-orientado), ou indicar um aumento na produção mantendo os insumos constantes (produto-orientado), conforme exposto por Farrell (1957) e Kumbhakar e Lovell (2000).

Dadas essas duas formas de orientação, a eficiência técnica adotada no presente trabalho será orientada para o produto, equação (1), em que se busca a máxima produção mantendo os insumos constantes.

$$ET_p(Y, X) = [\text{máx}\{\phi: \phi Y_i \leq F(X_i, Z_i)\}]^{-1} \quad (1)$$

Sendo que ET_p é a eficiência técnica orientada para o produto; Y_i é o produto observado da propriedade i ; e X_i e Z_i são os insumos observados (REINHARD; LOVELL; THIJSSSEN, 1999).

Na presença de diferentes conjuntos de tecnologia de produção, primeiro mensura-se a eficiência do produtor em relação à fronteira do grupo e posteriormente em relação à metafronteira. Um produtor tecnicamente eficiente é definido como aquele cuja produção ocorre em um ponto da fronteira de produção. Considerando a função de produção $f(x_{ji})$, a eficiência técnica de uma propriedade i do grupo j (i é a propriedade, pertencente ao grupo j que são as regiões brasileiras) orientada para o produto pode ser visualizada na equação (2) (KUMBHAKAR; LOVELL, 2000).

$$ET_i^j = \frac{Y_{ji}}{f(x_{ji})} \quad (2)$$

Sendo que ET_i^j representa a eficiência técnica da propriedade i no grupo j ; Y_{ji} é a produção observada; e $f(x_{ji})$ é a fronteira de produção calculada.

Como forma de expandir a análise para além da eficiência técnica e considerar a importância de informações ambientais, trabalha-se também com a eficiência ambiental. A eficiência ambiental é obtida quando se produz um determinado nível de produto com a menor quantidade de recursos naturais e/ou com o menor dano ambiental, tal como a menor emissão de gases de efeito estufa (REINHARD; LOVELL; THIJSSSEN, 2000).

Na Teoria Econômica, os danos ambientais são tratados como externalidades negativas e, portanto, eles são modelados como um produto indesejado. Mas, considerando que os fatores de produção são alocados de maneira ineficiente, a abordagem aqui apresentada será com a utilização do dano ambiental como um insumo produtivo, ou seja, a variável ambiental indesejável é acrescentada na função de produção como insumo. Nesse caso, o modelo de Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) trata a eficiência ambiental orientada para os insumos tal como mostrado na equação (3).

$$EA_i^j = [\min \theta : F(X_{ji}, \theta Z_{ji}) \geq Y_{ji}] \quad (3)$$

Em que Y_{ji} é a produção observada da propriedade i pertencente ao grupo j ; X_{ji} são os insumos utilizados na produção pela propriedade i ; e Z_{ji} representa o insumo ambiental indesejável (como o gás metano – CH_4 , emitido pela propriedade i pertencente ao grupo j , que serão as macrorregiões brasileiras).

Seguindo a abordagem de Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) e Abdulai e Abdulai (2017), a eficiência ambiental (EA) de uma propriedade i em relação à fronteira do grupo j é considerada a razão entre o uso mínimo possível e o uso observado da variável ambiental indesejável, expressa na equação (4).

$$EA_i^j = \frac{E_{ji}^*}{E_{ji}} \quad (4)$$

Em que E_{ji}^* é o mínimo viável para o uso do insumo ambiental indesejável, e E_{ji} é a quantidade observada deste insumo.

Para Huang, Huang e Liu (2014) e Abdulai e Abdulai (2017), as eficiências técnicas e ambientais de cada propriedade i relacionadas à metafronteira, conhecidas como metaeficiências técnica (MET) e ambiental (MEA), são obtidas pelo produto entre as eficiências de cada grupo e a taxa de metatecnologia¹⁷ (*metatechnology ratio* - MTR), as quais podem ser visualizadas nas equações (5) e (6).

$$MET_{ji} = MTR_i^j \times ET_i^j \quad (5)$$

$$MEA_{ji} = MTR_i^j \times EA_i^j \quad (6)$$

Tanto a eficiência técnica quanto a eficiência ambiental serão mensuradas para os três modelos a serem adotados no presente trabalho, sendo eles: Modelo I = a fronteira de produção simples; Modelo II = a fronteira de produção com *dummy*; e, Modelo III = a metafronteira produção.

Ressalta-se que, para obter as eficiências técnicas, serão utilizadas a abordagem paramétrica e as formas funcionais Cobb-Douglas e Translog. Portanto, cada modelo será estimado duas vezes (usando a Cobb-Douglas e usando a Translog), havendo seis estimativas da função fronteira de produção. Essas duas formas funcionais (Cobb-Douglas e Translog) foram escolhidas por serem consideradas flexíveis, lineares e parcimoniosas nos parâmetros (COELLI; RAO; BATTESE, 1998)

Mas, para obter a eficiência ambiental, utilizar-se-á apenas a forma funcional Translog, pois ela fornece os coeficientes das interações entre a variável ambiental e as demais variáveis da função de produção.

4.2 Modelos de fronteira e de metafronteira estocástica

O presente trabalho utiliza os modelos de fronteira e da metafronteira estocásticas na mensuração das eficiências técnica e ambiental, pois são modelos que incorporam o termo de

¹⁷ Autores como Battese, Rao e O'Donnell (2004) e Huang, Huang e Liu (2014) usam a terminologia *technology gap ratio* (TGR) para indicar a diferença entre a fronteira do grupo e a metafronteira, entretanto, O'Donnell, Rao e Battese (2008) nomeiam esse espaço como *metatechnology ratio* (MTR), pois o aumento na taxa indica redução na diferença entre a fronteira e metafronteira. No presente estudo será adotado a terminologia taxa de metatecnologia (MTR).

erro, o qual possui duas partes: a aleatoriedade (choques aleatórios que fogem do controle do produtor) e a ineficiência técnica. Além disso, a metafronteira possibilita mensurar a eficiência para diferentes níveis de tecnologia adotados por grupos distintos de produtores.

A fronteira de produção (modelo geral apresentado na equação (7)) é formada pela associação de uma produção y_i e um vetor de insumos (que podem ser fatores de produção) x_i , fornecendo o máximo de produção para cada nível de insumo. A firma que estiver sobre a fronteira de produção apresenta eficiência técnica máxima, ou seja, ela alcançará o máximo de produto dado o conjunto de insumos (COELLI et al., 2005; KUMBHAKAR; LOVELL, 2000). Nesse modelo há uma única fronteira de produção para todos os produtores, independente dos diferentes níveis de tecnologias das firmas envolvidas. Se apenas estimar a equação (7) tem-se o que se chama neste texto de Modelo I e Modelo II.

$$y_i = f(x_i, Z_i; \beta) \cdot \varepsilon_i \quad (7)$$

Sendo que y_i é o nível de produção da propriedade i , sendo que há n propriedades, de modo que $i = 1, 2, \dots, n$; x_i é o vetor de insumos; a variável Z_i representa o insumo ambiental¹⁸ (emissão de gás metano, por exemplo); $f(x_i; \beta)$ é uma fronteira de produção; β é um vetor de parâmetros da função a ser estimada; ε_i é o termo de erro que representa $(v_i - u_i)$, em que v_i é um termo de aleatoriedade, que apresenta distribuição normal, média zero e variância σ_v^2 ; e u_i representa o termo de ineficiência¹⁹.

Considerando que a ineficiência (termo u_i) pode apresentar comportamento heterocedásticos (com variância não constante), Battese e Coelli (1995) e Kumbhakar, Wang e Horncastle (2015) sugerem que sejam estimados, simultaneamente com a fronteira estocástica, os fatores que explicam a ineficiência, tornando, assim, as estimativas consistentes.

A fronteira estocástica pode ser estimada como exposto anteriormente na equação (7), e para modelar a ineficiência técnica dos produtores utiliza-se a equação (8), que é uma função linear de um vetor de variáveis.

$$u_i = z_i \delta + W_i \quad (8)$$

¹⁸ Alguns trabalhos tratam a variável ambiental como um produto indesejável (externalidade negativa), entretanto, no modelo abordado neste trabalho, a variável será incorporada na função de produção como um insumo produtivo convencional.

¹⁹ Adota-se, para estimação dos modelos, a distribuição normal-truncada, mas existem outras distribuições de probabilidade que podem ser testadas para o cálculo do termo de ineficiência, tais como: a *half-normal*, a gama e a exponencial (KUMBHAKAR; LOVELL, 2000).

Em que u_i representa o termo de ineficiência, z_i é o vetor de variáveis referentes às características dos produtores e da propriedade, δ são os coeficientes estimados, e W_i é o termo aleatório que apresenta distribuição normal, média zero e variância σ^2 .

Nesse contexto, a eficiência técnica é estimada usando a equação (9).

$$ET_i = \frac{y_i}{[f(x_i, z_i; \beta) \cdot \exp\{v_i\}]} = \{\exp(-u_i)\} \quad (9)$$

Dado que $u_i \geq 0$, a eficiência técnica estará entre 0 e 1 (isto é: $0 \leq ET_i \leq 1$), tal que $ET_i = 0$ indica ineficiência total; e $ET_i = 1$ indica que a propriedade i é totalmente eficiente.

Para considerar os diferentes níveis de tecnologias²⁰ de produção presentes em um mesmo setor (como a pecuária bovina leiteira) e obter eficiências técnicas comparáveis entre os seus produtores, a metafronteira de produção proposta por Battese, Rao e O'Donnell (2004) é utilizada para estimar a eficiência dos produtores de leite. A abordagem utilizada no presente trabalho é a proposta por Huang, Huang e Liu (2014), em que a metafronteira estocástica (*stochastic metafrontier* - SMF) na primeira e na segunda fases não dependem de técnicas de programação, pois elas são baseadas na estrutura de fronteira estocástica. A estimativa da metafronteira estocástica se destaca por: (a) realizar inferências estatísticas sem depender de simulações, (b) estimar o *gap* tecnológico, e (c) permitir que o termo de erro unilateral seja especificado como uma função de variáveis ambientais – que estão além do controle dos produtores (HUANG; HUANG; LIU, 2014).

A primeira fase da metafronteira (chamada nesse texto de Modelo III) consiste na estimação da fronteira de produção de cada grupo (no caso desta tese, os grupos são os produtores de cada uma das cinco macrorregiões brasileiras, ou seja, há cinco grupos), fornecendo a eficiência técnica de cada propriedade em relação à fronteira de produção do seu grupo (BATTESE; RAO; O'DONNELL, 2004; HUANG; HUANG; LIU, 2014). Mas além da eficiência técnica, alguns estudos estão considerando na produção de um produto a eficiência ambiental. Nesse caso, a propriedade é eficiente quando ela está utilizando a menor quantidade de um recurso natural (no caso desta tese, a propriedade estará emitindo a menor quantidade de gases de efeito estufa) para a produção de determinado nível de produto. Diante disso,

²⁰ Esses conjuntos de tecnologias podem ser formados pelos aspectos culturais, regionais, climáticos, recursos financeiros, demográficos, dentre outros que compõem o ambiente da região em que se situam os produtores (HAYAMI, 1969; HAYAMI; RUTTAN, 1970).

utilizando a abordagem de Reinhard, Lovell e Thijssen (1999), Huang, Huang e Liu (2014) e Abdulai e Abdulai (2017), tem-se uma fronteira de produção estocástica adaptada, a qual é mostrada na equação (10).

$$y_{ji} = f^j(x_{ji}, Z_{ji}; \beta) \cdot \exp\{v_{ji} - u_{ji}\} \quad (10)$$

Em que y_{ji} é o nível de produção da propriedade i do grupo j , sendo que há n propriedades, de modo que $i = 1, 2, \dots, n$ e J grupos, sendo que $j = 1, 2, \dots, J$ (por exemplo, j pode ser igual a 5, as cinco macrorregiões brasileiras); x_{ji} é um vetor de insumos, a variável Z_{ji} representa o insumo ambiental (emissão de gás metano pela propriedade i pertencente ao grupo j), $f^j(x_{ji}; \beta)$ é uma fronteira de produção do grupo j , β é um vetor de parâmetros da função a ser estimada no grupo j . O termo de erro (ε_{ji}) apresenta dois componentes v_{ji} e u_{ji} (termo não negativo que representa a ineficiência técnica intragrupos). Nesse contexto, a eficiência técnica será a equação (11).

Os danos ambientais são tratados na teoria econômica como externalidades negativas e, portanto, eles são modelados como um produto indesejado. No entanto, seguindo a abordagem de Reinhard, Lovell e Thijssen (1999), nesta tese o dano ambiental será considerado como um insumo no processo de produção, ou seja, a variável ambiental indesejável é acrescentada na função de produção como insumo. Esse procedimento pode ser justificado pelo pressuposto de que não é possível que ocorra a produção sem que alguma quantidade de poluente seja emitida.

$$ET_i^j = \frac{y_{ji}}{[f^j(x_{ji}, Z_{ji}; \beta) \cdot \exp\{v_{ji}\}]} = \{\exp(-u_{ji})\} \quad (11)$$

Dado que $u_{ji} \geq 0$, a eficiência técnica da propriedade i pertencente ao grupo j (os grupos são as macrorregiões brasileiras) estará entre 0 e 1 ($0 \leq ET_i^j \leq 1$), tal que $ET_i^j = 0$ indica total ineficiência e $ET_i^j = 1$ indica a propriedade i ser totalmente eficiente. Como apresentado anteriormente (equação (8)), considerando que a ineficiência pode apresentar comportamento heterocedástico, estima-se simultaneamente os determinantes que explicam a ineficiência. Por exemplo, se aplicada a fronteira estocástica Translog em uma propriedade da região Sul do Brasil, que apresentou u_{ji} de 0,134, a eficiência técnica da propriedade será de 0,878, podendo esta propriedade ter bom nível de eficiência.

Para se obter a eficiência técnica das propriedades pertencentes ao grupo j podem ser usadas duas formas funcionais da fronteira de produção estocástica: a Cobb-Douglas ou a Translog.

Por meio de um teste de Máxima Verossimilhança, será identificada a forma funcional que apresenta a melhor adequação aos dados, sendo elas: a forma restritiva (a Cobb-Douglas – equação (12)); e, a menos restritiva, ou seja, que apresenta interações entre as variáveis (a Translog- equação (13)).

$$\ln Y_{ji} = \theta_0 + \sum_l \theta_l \ln X_{jil} + \theta_z \ln Z_{ji} + v_{ji} - u_{ji} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \ln Y_{ji} = & \beta_0 + \sum_l \beta_l \ln X_{jil} + \beta_z \ln Z_{ji} + \frac{1}{2} \sum_l \sum_k \beta_{lk} \ln X_{jil} \ln X_{jik} \\ & + \sum_l \beta_{lz} \ln X_{jil} \ln Z_{ji} + \frac{1}{2} \beta_{zz} (\ln Z_{ji})^2 + v_{ji} - u_{ji} \end{aligned} \quad (13)$$

Em que v_{ji} é o termo de “ruído branco”; u_{ji} representa o termo não negativo de ineficiência técnica; X_{ji} e Y_{ji} representam, respectivamente, os insumos e o produto; Z_{ji} representa as emissões de gás metano, sendo que os subíndices k e l referem-se aos diferentes insumos, i são as propriedades consideradas na análise e j são os grupos (no caso desta tese serão as cinco macrorregiões brasileiras).

A eficiência técnica será mensurada utilizando a equação (11), considerando que se a propriedade for tecnicamente eficiente ocorrerá de $u_{ji} = 0$ nas equações (12) ou (13). A produção de uma propriedade ambientalmente eficiente é atingida quando se substitui Z_{ji} por Z_{ji}^F (emissões de metano do estabelecimento mais eficiente), dado $u_{ji} = 0$, na equação (13) de modo a obter a equação (14).

$$\begin{aligned} \ln Y_{ji} = & \beta_0 + \sum_l \beta_l \ln X_{jil} + \beta_z \ln Z_{ji}^F + \frac{1}{2} \sum_l \sum_k \beta_{lk} \ln X_{jil} \ln X_{jik} \\ & + \sum_l \beta_{lz} \ln X_{jil} \ln Z_{ji}^F + \frac{1}{2} \beta_{zz} (\ln Z_{ji}^F)^2 + v_{ji} \end{aligned} \quad (14)$$

A mensuração da forma logarítmica da eficiência ambiental (EA) da propriedade i pertencente ao grupo j é obtida através da equação (15), sendo: $\ln EA_i^j = \ln Z_{ji}^F - \ln Z_{ji}$, a qual

foi construída quando se igualam as equações (13) e (14) (REINHARD; LOVELL; THIJSSSEN, 1999). Tem-se:

$$\ln EA_i^j = \left\{ -(\beta_z + \sum_l \beta_{lz} \ln X_{jil} + \beta_{zz} \ln Z_{ji}) \pm \left[(\beta_z + \sum_l \beta_{lz} \ln X_{jil} + \beta_{zz} \ln Z_{ji})^2 - 2\beta_{zz} u_{ji} \right]^{0,5} \right\} / \beta_{zz} \quad (15)$$

Para Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) a eficiência ambiental obtida através da equação (15) pode ser calculada e apresentar escores diferentes apenas se as elasticidades de produção forem variáveis. Esta propriedade pode ser satisfeita por várias formas funcionais, dentre elas a Translog²¹, a qual será utilizada na presente tese.

Por exemplo: considere uma propriedade da região Sul do Brasil, e assuma a fronteira estocástica Translog da região e use o resultado de u_{ji} de 0,134 bem como os dados referentes aos insumos de produção da propriedade. Ao se aplicar a equação (15) obtém-se a eficiência ambiental de 0,849. Por ser um valor próximo de 1, a propriedade pode ser considerada eficiente ambientalmente.

Os procedimentos para obter as eficiências técnica e ambiental pelo modelo de fronteira estocástica simples, ou usando a fronteira estocástica com *dummies* regionais, ou pela primeira fase do modelo metafronteira (estimação das fronteiras estocásticas de cada região) são similares. No entanto, quando constatado que os produtores de leite apresentam diferentes níveis de tecnologia em cada região, estima-se o modelo de metafronteira estocástica (Modelo III). Para estimação da metafronteira estocástica (segunda fase) usam-se os resultados dos modelos de fronteira estocástica de cada grupo de produtores (que estão localizados nas macrorregiões brasileiras) e é incluído no modelo as variáveis institucionais que explicam o *gap* tecnológico entre os produtores das regiões (na presente tese é utilizado a variável tempo durante o qual a propriedade está recebendo a Assistência Técnica e Gerencial do Senar).

Partindo da hipótese de que as propriedades produtoras de leite no Brasil apresentam heterogeneidade no conjunto de tecnologias que elas adotam e que essas propriedades estão divididas em grupos (na presente tese, os grupos são formados considerando as cinco macrorregiões brasileiras), o modelo metafronteira é aplicado (segunda fase).

²¹ Utilizando a forma funcional Cobb-Douglas a eficiência ambiental teria escores similares ao da eficiência técnica, pois a equação seria $EA_i^j = \frac{\{\exp(-u_{ji})\}}{\beta_z}$.

Seguindo o modelo de metafronteira estocástica de Huang, Huang e Liu (2014) e adaptando com a abordagem de Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) e Abdulai e Abdulai (2017) tem-se a equação (16)²².

$$\ln \hat{f}^j (X_{ji}, Z_{ji}) = \ln f^M (X_{ji}, Z_{ji}) + v_{ji}^M + u_{ji}^M \quad (16)$$

Em que $\ln \hat{f}^j (X_{ji}, Z_{ji})$ são as fronteiras individuais estimadas para cada grupo de produtores de leite e $f^M (X_{ji}, Z_{ji})$ é a metafronteira de produção. Utilizando a abordagem de Huang, Huang e Liu (2014), $\ln \hat{f}^j (X_{ji}, Z_{ji})$ são as quantidades produzidas de cada propriedade a partir dos coeficientes das funções de produção intragrupos estimados na primeira fase.

Huang, Huang e Liu (2014) observam que $f^j (X_{ji}, Z_{ji}) \leq f^M (X_{ji}, Z_{ji})$, definindo que a diferença entre a fronteira de produção do grupo j e a metafronteira corresponde à taxa de metatecnologia²³ (*metatechnology ratio* - MTR), a qual é menor ou igual a unidade (equação (17)).

$$MTR_i^j = \frac{f^j (X_{ji}, Z_{ji})}{f^M (X_{ji}, Z_{ji})} = e^{-u_{ij}^M} \quad (17)$$

Quanto maior é a MTR_i^j , menor é o *gap* tecnológico existente entre a fronteira do grupo e a metafronteira. Sendo que o valor igual à unidade indica que a fronteira do grupo coincide com a metafronteira (O'DONNELL; RAO; BATTESE, 2008). Seguindo o exemplo da propriedade da região Sul do Brasil citado anteriormente, e aplicando a metafronteira estocástica estimada com uso da Translog, obtém-se o resultado de u_{ij}^M de 0,064. Ao se aplicar a equação (17) obtém-se a taxa de metatecnologia de 0,939 da propriedade. Por ser um valor próximo de 1, isto indica que a propriedade apresenta baixo *gap* tecnológico em relação à metafronteira de estocástica.

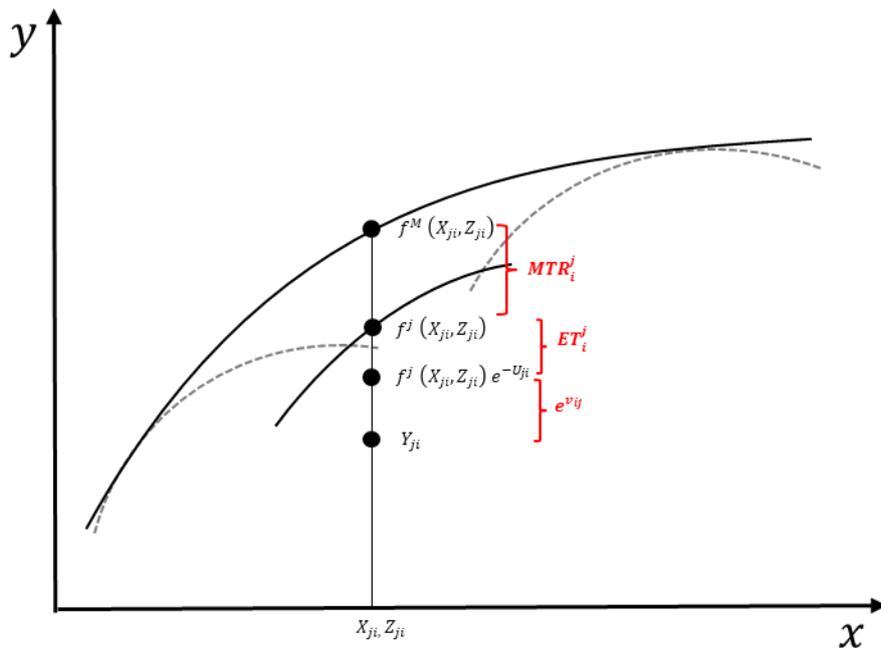
Para melhor entendimento de como a metafronteira é decomposta em relação ao produto observado de uma propriedade leiteira, a Figura 4 ilustra, em um determinado nível de insumo (X_{ji}, Z_{ji}) , os três componentes presentes na metafronteira de produção: MTR_i^j é o *gap*

²² A estimativa na segunda fase pode ser obtida de duas formas funcionais: Cobb-Douglas ou Translog.

²³ Battese, Rao e O'Donnell (2004) e Huang, Huang e Liu (2014) referem-se a essa medida como *technology gap ratio* (TGR) – lacuna tecnológica. Mas, O'Donnell, Rao e Battese (2008) nomeiam essa medida como *metatechnology ratio* (MTR), pois o aumento na taxa indica redução na diferença entre a fronteira do grupo e a metafronteira.

tecnológico em relação à metafronteira; ET_i^j é a eficiência técnica da empresa em relação ao grupo; e o $e^{v_{ij}}$ é o termo de aleatoriedade.

Figura 4 - Decomposição da metafronteira



Fonte: Elaborada pela autora com base em Huang, Huang e Liu (2014).

Com a segmentação das propriedades em grupos, é possível obter e comparar as eficiências técnica e ambiental de cada propriedade (i) produtora de leite relacionadas à metafronteira, conhecidas como metaeficiências técnica (MET) e ambiental (MEA). As estimativas são obtidas pelo produto entre as eficiências das propriedades de cada j grupo (ET_i^j e EA_i^j) e a taxa de metatecnologia (MTR_i^j) – também citada no texto como *gap* tecnológico, as quais são visualizadas nas equações (18) e (19) (ABDULAI; ABDULAI, 2017; HUANG; HUANG; LIU, 2014).

$$MET_{ji} = MTR_i^j \times ET_i^j \quad (18)$$

$$MEA_{ji} = MTR_i^j \times EA_i^j \quad (19)$$

Aplicando as equações (18) e (19) no exemplo da propriedade da região Sul do Brasil, com a taxa de metatecnologia de 0,939, eficiência técnica dentro da região Sul de 0,878 e eficiência ambiental de 0,849, tem-se como resultado que a metaeficiência técnica é de

aproximadamente 0,824 e a metaeficiência ambiental de 0,797. Percebe-se que ao se multiplicar as eficiências da propriedade obtidas dentro da região pela MTR, os valores das eficiências ficam ajustados e assim eles podem ser comparados com as eficiências das demais regiões do Brasil.

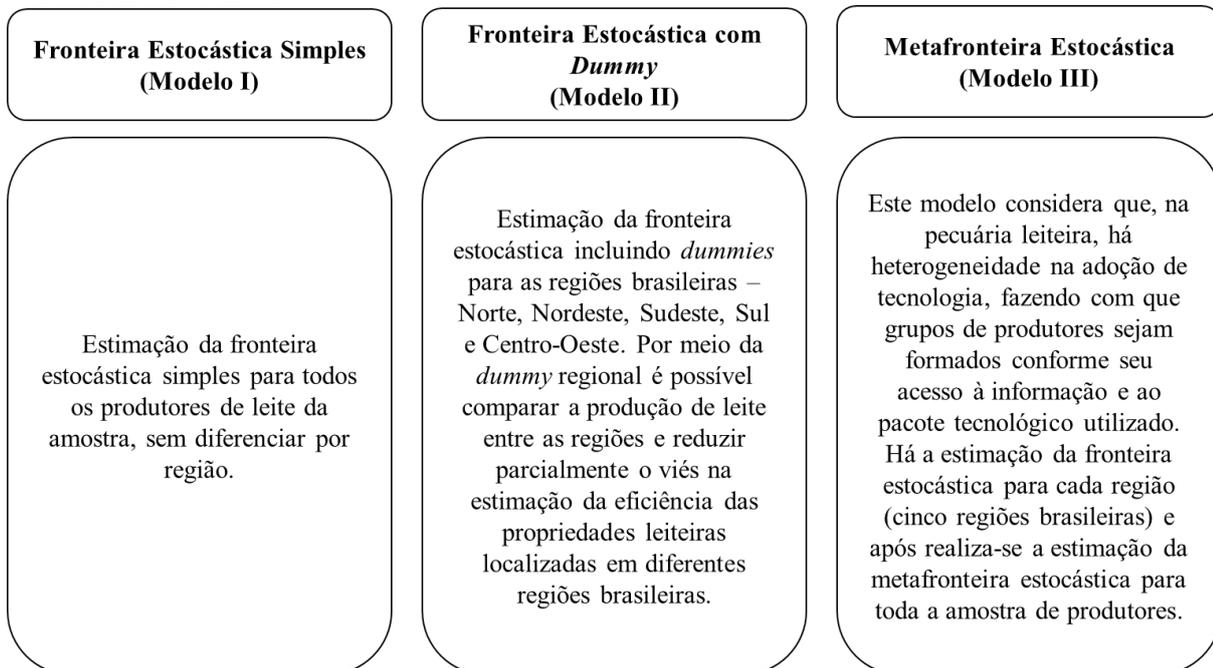
Vários fatores podem auxiliar na explicação do termo de ineficiência e do *gap* tecnológico¹¹, por exemplo, as características da propriedade, da atividade e dos produtores. Seguindo Huang, Huang e Liu (2014) e Kumbhakar, Wang e Horncastle (2015) um conjunto de variáveis institucionais (H_{ji}), selecionadas com base na literatura, são consideradas na estimação da fronteira estocástica do Brasil, dos grupos (que são os produtores agrupados por macrorregiões do Brasil) e na metafronteira. Para explicar a ineficiência técnica (termo de erro, u_{ji}) das propriedades em relação à fronteira estocástica da região a que pertencem (Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste) e do Brasil, incorporou-se no modelo as variáveis nível educacional, idade e despesas com medicamentos – primeira fase. Para explicar o *gap* tecnológico entre a fronteira do grupo e a metafronteira, usou-se a variável acesso à Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) do Senar – segunda fase. As variáveis foram selecionadas de acordo com a literatura nacional e internacional sobre eficiência técnica e ambiental (que foram referenciadas no capítulo 2 desta tese).

A região de atuação das propriedades leiteiras pode fazer com que a adoção de tecnologia seja distinta entre os produtores de leite, dados os fatores sociais, culturais e edafoclimáticos serem diferentes entre as regiões do Brasil. Considerando esses fatores, a formação dos grupos de propriedades produtoras de leite utilizada na metafronteira foi relacionada às cinco regiões brasileiras: Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste. Na seção 4.4, ainda neste capítulo, descrevem-se as variáveis da fronteira de produção e as variáveis institucionais que fazem parte de cada estimativa (ver Quadro 3).

De maneira resumida, a presente pesquisa estimará a função de produção e as eficiências da pecuária leiteira para as diferentes regiões brasileiras, utilizando três modelos de fronteira estocástica, apresentados na Figura 5. E cada modelo será estimado considerando a forma funcional da Cobb-Douglas ou da Translog. Portanto, seis equações serão estimadas (ver item 5.2.1) e seus resultados serão comparados entre si. Em seguida, os valores das eficiências técnica e ambiental²⁴ gerados por cada equação estimada serão comparados entre si e um deles será adotado para alcançar os objetivos específicos segundo e terceiro desta tese.

²⁴ Ressalta-se que caso seja, no capítulo 5, selecionado para atingir este propósito o Modelo III com Translog, serão consideradas as metaeficiências técnica e ambiental (ver equações (18) e (19)).

Figura 5 - Resumo dos três modelos (abordagens) utilizados na estimação da fronteira de produção e das eficiências técnicas



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3 Testes

Alguns testes são conduzidos, inicialmente, para que se estime as fronteiras estocásticas e se obtenha os níveis de eficiência e metaeficiência técnica e ambiental das propriedades produtoras de leite no Brasil.

Para identificar a forma funcional – Translog ou Cobb-Douglas – que melhor se ajuste à estimação da fronteira estocástica simples (Modelo I), da fronteira estocástica com *dummy* (Modelo II) e da metafronteira (Modelo III), realizam-se os testes de *Akaike* (*Akaike Information Criterion* - AIC) e do *Bayesiano* (*Bayesian Information Criterion* - BIC), sendo que quanto menor é o valor encontrado, mais indicado é o modelo. Aplicou-se também o Teste Razão de Verossimilhança (LR) - equação (20), em que a hipótese nula (H_0) é o uso da forma funcional Cobb-Douglas e a hipótese alternativa (H_1) indica o uso da forma funcional Translog. Para efetuar o teste LR é utilizado os valores *log-verossimilhança* (LL)²⁵ de cada modelo estimado. O valor crítico da estatística do teste é obtido da tabela de Kodde e Palm (1986).

$$LR = -2\{\ln[L(H_0)] - \ln[L(H_1)]\} \quad (20)$$

²⁵ *Log-verossimilhança* (LL – em inglês *Log Likelihood*) é apresentada na equação (20) como $\ln(L)$.

Para verificar se os modelos estimados apresentam o componente de ineficiência técnica realiza-se o teste de razão de verossimilhança, em que a hipótese nula, $H_0 = \delta_u^2 = 0$, indica que não há ineficiência técnica nos estabelecimentos analisados, e a hipótese alternativa, $H_1 = \delta_u^2 > 0$, indica que há ineficiência técnica nas propriedades. Busca-se rejeitar a hipótese nula, tendo em vista que a estimativa das fronteiras e metafronteira implica a presença de algumas propriedades como não tendo plena eficiência (ver Figura 3).

Após escolher a forma funcional e verificar a presença de ineficiência, realiza-se o Teste Razão de Verossimilhança para identificar se o modelo mais adequado na estimação utiliza o vetor de variáveis que explicam a ineficiência. Nesse teste, a hipótese nula (H_0) refere-se o uso do modelo Translog ou Cobb-Douglas e a hipótese alternativa (H_1) indica o uso do modelo Translog ou Cobb-Douglas com o vetor de variáveis que explicam a ineficiência técnica das propriedades. O valor crítico da estatística do teste é obtido da tabela de Kodde e Palm (KODDE; PALM, 1986).

Para testar se os produtores pertencentes a diferentes regiões brasileiras compartilham da mesma tecnologia, aplica-se o teste razão de verossimilhança (LR) formulado por Battese, Rao e O'Donnell (2004) – ver equação (20). Em que a hipótese nula (H_0) indica que as fronteiras de produção dos grupos de propriedades são as mesmas (há uma única fronteira de produção para todas as regiões), a hipótese alternativa (H_1) é que as fronteiras de cada grupo de propriedades são distintas. A rejeição da hipótese nula indica que o modelo metafronteira pode ser estimado. Os graus de liberdade são calculados com base na diferença entre o número de parâmetros estimados em H_0 e H_1 . O valor crítico da estatística do teste é obtido da tabela de distribuição de Qui-Quadrado.

4.3 Analisando os determinantes da eficiência ambiental

A fim de avaliar, para o caso brasileiro, as propostas feitas por organismos internacionais (como *World Bank* e FAO, por exemplo) sobre a relação entre a eficiência ambiental, a eficiência técnica²⁶ e a escala de produção de leite, realizam-se o teste de correlação de Spearman, a análise de correspondência múltipla e estima-se uma regressão linear múltipla.

O teste de correlação tem por objetivo analisar o grau de associação linear entre duas variáveis: as eficiências técnica e ambiental (obtendo o coeficiente de correlação). Para tanto,

²⁶ É importante ressaltar que caso seja, no capítulo 5, selecionado para atingir este propósito o Modelo III com Translog, serão consideradas as metaeficiências técnica e ambiental (ver equações (18) e (19)).

utiliza-se a correlação de Spearman e é esperado uma correlação positiva entre as variáveis citadas.

A análise de correspondência múltipla (ACM) busca avaliar o grau de associação entre as variáveis eficiência ambiental, eficiência técnica, escala de produção de leite e região de localização do produtor e suas categorias, que nesta tese serão os quartis nos quais se encontram as três primeiras variáveis. Ou seja, para realização da ACM as três variáveis contínuas (eficiência ambiental, eficiência técnica e escala de produção de leite) foram transformadas em variáveis categóricas, as quais são os quatro quartis que as agrupam. Por exemplo, os produtores de leite que estão no último quartil (quartil 4) são os que apresentam os 25% maiores valores da produção de leite, da eficiência técnica e da eficiência ambiental. De modo similar, os produtores de leite que estão no primeiro quartil (quartil 1) são os que apresentam 25% menores valores da produção de leite, da eficiência técnica e da eficiência ambiental. As regiões foram divididas da seguinte forma: (1) Norte, (2) Nordeste, (3) Sudeste, (4) Sul e (5) Centro-Oeste.

A análise de correspondência múltipla trata-se de uma técnica multivariada, que permite a associação entre mais de duas variáveis categóricas. As principais informações obtidas na aplicação dessa análise são a intensidade de associação (medida pelo teste do Qui-Quadrado) e o mapa perceptual (o diagrama de dispersão). Essas informações indicam se há similaridades e diferenças entre as variáveis e suas categorias, e identificam se há formação de grupos conforme a sua proximidade, ou seja, quando as categorias estiverem muito próximas, há forte associação entre elas (FÁVERO; BELFIORE, 2017).

Tanto o coeficiente de correlação quanto a ACM são procedimentos estatísticos e que não identificam ordem de causação entre as variáveis analisadas. Por meio da regressão múltipla (e assumida a ordem de causação sugerida pelo *World Bank* e FAO), busca-se estimar e quantificar os impactos que as variáveis eficiência técnica e produção de leite (variáveis explicativas) têm sobre a eficiência ambiental (variável dependente) das propriedades analisadas. Em linhas gerais, adota-se equação (21):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + u_i \quad (21)$$

Em que Y_i é a variável dependente (eficiência ambiental), X_i são as variáveis explicativas (eficiências técnica e escala de produção de leite)²⁷, u_i é o termo de erro, e i é o indicador da i -ésima observação. β_0 é o intercepto e β_1 e β_2 são os coeficientes angulares.

O modelo empírico considerando o conjunto de variáveis explicativas da eficiência ambiental é apresentado na equação (22). Estimou-se o modelo considerando os produtores agrupados a nível nacional, incluindo variáveis *dummies* referentes às regiões brasileiras, e estimou-se também a equação (22) para os produtores agrupados por cada macrorregião do Brasil em que se situam, sem as variáveis *dummies* – apenas com eficiência técnica e produção de leite como variáveis explicativas.

$$EA = \beta_0 + \beta_1 ET + \beta_2 \text{produçãodeleite} + \beta_3 \text{norte} + \beta_4 \text{nordeste} + \beta_5 \text{sudeste} + \beta_6 \text{centrooeste} + u_i \quad (22)$$

Para avaliação dos resultados das regressões, os testes de presença ou não de heterocedasticidade (*White* e *Brush-Pagam*); de multicolinearidade (Fator de Inflação da Variância - VIF); e de normalidade dos resíduos serão realizados²⁸.

4.4 Base de dados e variáveis selecionadas

Os dados utilizados na presente pesquisa se referem aos produtores de leite assistidos pelo Programa de Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) do Sistema Nacional de Aprendizagem Rural (Senar) no ano de 2021²⁹. Os dados foram obtidos junto ao Senar Central, com sede em Brasília, sendo coletados por técnicos de campo das regionais que realizam atendimentos mensais aos produtores durante o ciclo de assistência, que tem duração de 2 anos. A autorização para o uso desses dados está no Anexo (Figura A4) a esta tese.

²⁷ As variáveis explicativas consideradas na regressão múltipla foram escolhidas considerando as que são normalmente consideradas na literatura e dada a disponibilidade da base de dados utilizada. Para futuros estudos, sugerem-se utilizar, caso estejam disponíveis, outras variáveis explicativas da metaeficiência ambiental.

²⁸ Os resultados dos testes referentes à avaliação estatística dos resultados das regressões são apresentados na Tabela A7 do Apêndice.

²⁹ Ressalta-se que entre 2020 e 2022, período da pandemia da covid-19, o Senar manteve o programa ATeG. O SENAR ofereceu serviço de atendimento virtual para produtores em grupo de risco ou com sintomas de covid-19 (produtor ou técnico). Toda visita tinha autorização do produtor e de sua família e eram adotados os procedimentos recomendados pelo Ministério da Saúde (tais como, uso de máscara, manutenção de distância, uso de álcool em gel, atendimento em local aberto e arejado, dentre outros) – ver SENAR (2022b).

O SENAR disponibilizou dados referentes a quatro anos: 2018 com 96 propriedades; 2019 com 442 propriedades; 2020 com 643 propriedades; e, 2021 com 5.496 propriedades. Utilizaram-se os dados referentes ao ano de 2021 com 5.496 propriedades assistidas. O número de observações considerado no modelo econométrico é, no entanto, menor, total de 4.767 propriedades (sendo que 13% das informações foram excluídas), pois com a finalidade de remover possíveis *outliers* da base foram adotados alguns tratamentos, como retirar propriedades que não apresentavam produção de leite, ou informação sobre o número de vacas ordenhadas e propriedades com informações duplicadas.

O banco de dados utilizado foi construído a partir da realização do Diagnóstico Produtivo Individualizado (DPI), em que o técnico de campo do SENAR aplica um questionário socioeconômico, faz o inventário de recursos e coleta as informações técnicas e econômicas da atividade como primeira ação do ciclo metodológico da ATeG. Com essas informações, o técnico saberá a situação atual da atividade agropecuária conduzida e da propriedade (SENAR, 2022a).

As variáveis selecionadas para a análise foram fundamentadas na literatura que aborda eficiência técnica e ambiental na produção de leite, cujas principais referências nacionais e internacionais foram apresentadas no capítulo 2, tais como: Reinhard, Lovell e Thijssen (1999, 2002, 2000), Nascimento et al. (2012), Dayananda (2016), Brito (2016), Silva e Bragagnolo (2018), Campos et al. (2018), Alem et al. (2019), Le, Jeffrey e An (2020). Essas variáveis compreendem a quantidade de leite produzida nas propriedades, os insumos usados para produção e as características do produtor(a) e da propriedade. Essas são informações disponibilizadas pelo Programa pela ATeG do Senar.

No Quadro 3 tem-se as variáveis que serão utilizadas na construção da fronteira estocástica para o Brasil (Modelo I), da fronteira estocástica para as regiões brasileiras usando *dummies* (para representar as regiões Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste frente à Região Sul – Modelo II), na estimação do modelo de metafronteira estocástica para as regiões (Modelo III – ver Figura 5) e na regressão linear proposta na equação (22). As variáveis consideradas na fronteira de produção são: produção de leite, área, despesas com mão de obra, despesas com suplementação alimentar, capital e emissões de CH₄. As variáveis institucionais que auxiliam na explicação da ineficiência técnica das propriedades são as despesas com medicamentos na propriedade, idade e escolaridade do produtor. E, para explicar o *gap* tecnológico da fronteira dos grupos em relação à metafronteira utilizou-se no modelo uma variável *dummy* referente ao tempo durante o qual a propriedade está recebendo a ATeG.

Quadro 3 - Variáveis utilizadas nos modelos

Variáveis	Unidade de medida	Modelo	Aplicação	Fonte
Quantidade produzida de leite de vaca	Litros	Fronteira, Metafronteira e Regressão Múltipla	Função de Produção e explicação da eficiência ambiental	ATeG Senar
Área total da propriedade	Hectares	Fronteira e Metafronteira	Função de Produção	ATeG Senar
Despesas com mão de obra (pessoal)	Reais	Fronteira e Metafronteira	Função de Produção	ATeG Senar
Despesas com suplementação alimentar (sal, ração, etc.)	Reais	Fronteira e Metafronteira	Função de Produção	ATeG Senar
Capital (s/ terra)	Reais	Fronteira e Metafronteira	Função de Produção	ATeG Senar
Emissões de metano	kgCO ₂ eq	Fronteira e Metafronteira	Função de Produção	Calculada
Despesas com medicamentos	Reais	Fronteira e Metafronteira	Explicação da Ineficiência	ATeG Senar
Idade do administrador (a) da propriedade em 2021	Anos	Fronteira e Metafronteira	Explicação da Ineficiência	ATeG Senar
Escolaridade administrador (a) da propriedade	1 = Ensino Fundamental para baixo 0 = Ensino médio para cima	Fronteira e Metafronteira	Explicação da Ineficiência	ATeG Senar
Tempo pelo qual a propriedade está recebendo a ATeG	1 = Propriedades com mais de 1 ano 0 = Propriedades iniciantes no programa menos de 1 ano	Metafronteira	Explicação do <i>gap</i> tecnológico	ATeG Senar
Regiões Brasileiras	1 = Norte 2 = Nordeste 3 = Sudeste 4 = Sul 5 = Centro-Oeste	Fronteira, Metafronteira e Regressão Múltipla	Separar grupos de produtores por região	Construída pela autora

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: Além das variáveis apresentadas no Quadro 3, foram testadas nos modelos de fronteira estocástica para explicar a ineficiência técnica as variáveis despesas administrativas e despesas com energia e combustível. Entretanto, os resultados dessas estimativas não foram satisfatórios em termos estatísticos, pois alguns coeficientes não apresentaram significância estatística e/ou apresentaram sinais opostos aos esperados.

Com relação ao insumo ambiental indesejável, utilizou-se neste trabalho a variável emissão de gás metano (CH₄) oriunda do processo de fermentação entérica das vacas em lactação. A emissão de metano é tratada como insumo comum da função de produção, em que o pressuposto adotado é que não é possível que ocorra a produção de leite sem que alguma quantidade de poluente seja emitida pelas vacas (apesar do pressuposto de que a melhoria técnica da pecuária permita a menor emissão de CH₄ por litro de leite produzido). A estimativa

da emissão de metano de cada propriedade amostrada será construída com base na metodologia apresentada pelo IPCC, *Tier 1*.

O IPCC apresenta três métodos de mensuração de emissões de CH₄ provenientes de vacas leiteiras: *Tier 1*, *Tier 2* e *Tier 3*. Na presente pesquisa adotou-se o método *Tier 1*, pois esse método utiliza fatores de emissão previamente escolhidos por outros estudos, considerando ele ser suficiente, ainda que não perfeito, para mensurar as emissões da maioria dos tipos de animais (por exemplo, bovinos, equinos e ovinos), na maioria dos países. Além disso, o método *Tier 1* apresentado pelo IPCC (2019) foi o escolhido devido à base de dados do Programa ATeG não conter todas as informações necessárias para o cálculo, por exemplo, das emissões via os métodos *Tier 2* e *Tier 3*.

Aplicando a equação (23) tem-se a quantidade de metano emitida pela propriedade leiteira analisada (IPCC, 2019).

$$Z_i = EF \times \left(\frac{\text{Vacas ordenhadas}}{10^6} \right) \quad (23)$$

Em que Z_i é a quantidade de metano emitida por cada propriedade, mensurada em GgCO₂eq (transformado em kg), e EF é o fator de emissão. Esse fator de emissão, apresentado na Tabela 2, é escolhido com base na produtividade da pecuária bovina leiteira (kg/vaca/ano)³⁰ e alcançada na propriedade agropecuária.

Tabela 2 - Fatores de emissão de CH₄, segundo a produtividade do rebanho bovino leiteiro

Produtividade (kg/vaca/ano)	Fator de emissão (kg CH ₄ /animal/ano)
Até 1.500	78
1.501 até 2. 500	87
Acima de 2.500	103

Fonte: Elaborada pela autora com base no IPCC (2019).

Ressalta-se que o uso da metodologia *Tier 1* apresenta limitações, uma vez que ela é processada de forma simples, com base na literatura e, também, por não diferenciar os fatores de emissão (ver Tabela 2) por regiões brasileiras, mesmo sabendo-se que a pecuária brasileira apresenta heterogeneidade regional entre os produtores de leite de vaca.

Na fronteira de produção (tal como nas equações (7) e (10), por exemplo) são esperadas relações positivas entre as variáveis explicativas e a produção de leite, indicando que quando

³⁰ Produtividade por kg (1 litro = 1,030 kg).

há aumentos (sinal positivo dos coeficientes estimados) nos fatores de produção das propriedades (tais como aumentos da suplementação alimentar, da mão de obra, do capital, da área total, e das emissões de metano) há, também, aumentos na quantidade produzida de leite. Para os coeficientes associados às variáveis que explicam a ineficiência, o sinal esperado do coeficiente relacionado à idade é positivo, ou seja, quanto maior é a idade do produtor menor tende a ser a sua adesão a novas tecnologias e maior a ineficiência da sua propriedade. Para o coeficiente associado ao nível de escolaridade, por outro lado, espera-se sinal negativo: quanto maior é o nível de ensino do produtor, melhor é a condução da sua propriedade (boas práticas) e maiores são os investimentos realizados, gerando redução na ineficiência técnica da propriedade. Para o coeficiente associado às despesas com medicamentos é esperado sinal negativo, pois aquelas indicam boas práticas e cuidado com o bem-estar do rebanho, reduzindo a ineficiência técnica das propriedades.

Com relação ao coeficiente associado à variável que explica o *gap* tecnológico (identificada no modelo como MTR, e apenas possível de ser avaliado no Modelo III), é esperado que a variável *dummy* referente ao tempo pelo qual a propriedade está participando da ATeG tenha sinal negativo, pois quanto mais instrução/visitas o produtor receber para conduzir a sua produção, menor será a sua lacuna tecnológica em relação à metafronteira estocástica.

Ao realizar a regressão linear (equação (22)) é esperado que a eficiência técnica apresente sinal positivo em relação a eficiência ambiental, corroborando com a proposta da FAO e do *World Bank* de que os produtores de leite que apresentarem eficiência técnica também apresentaram eficiência ambiental. Também, espera-se que a produção de leite apresente sinal positivo, indicando que quanto maior os ganhos de escala de produção, maior é a eficiência ambiental da propriedade e menores são as emissões de metano por litro de leite³¹.

Todas as estimativas foram obtidas utilizando-se o programa estatístico Stata versão 15.

³¹ Ressalta-se que caso seja, no capítulo 5, selecionado para atingir este propósito o Modelo III com Translog, serão consideradas as metaeficiências técnica e ambiental (ver equações (18) e (19)).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados das estimativas realizadas. Na seção 5.1, faz-se uma análise descritiva das variáveis consideradas nos modelos econométricos a serem estimados. A seção 5.2 explora as estimativas das três abordagens de fronteira estocástica (a simples, a com *dummies* regionais e a metafronteira) e os resultados obtidos das eficiências técnica e ambiental a partir dessas três abordagens (chamadas de modelos). A seção 5.3 apresenta os resultados das estimativas das metaeficiências técnica e ambiental para as regiões brasileiras, obtidos a partir da estimativa da metafronteira estocástica (Modelo III). E, por fim, na seção 5.4 analisam-se os determinantes da metaeficiência ambiental.

5.1 Produtores de leite assistidos pelo Programa de Assistência Técnica e Gerencial do SENAR

O programa ATeG do Senar atende mais de 30 atividades, sendo que a bovinocultura de leite está entre as atividades com mais propriedades contempladas por este programa. Segundo dados do Senar (2022b), entre 2017 e 2021, a ATeG bovinocultura de leite foi responsável por atender mais de 50 mil propriedades, com a colaboração de aproximadamente 1.800 técnicos de campo. Os dados utilizados na presente pesquisa referem-se às propriedades leiteiras atendidas pela ATeG no ano de 2021, contemplando 5.496 produtores. No entanto, a partir de alguns tratamentos, como exclusão de propriedades com informações faltantes, chegaram-se a 4.767 propriedades a serem analisadas no presente trabalho.

As propriedades analisadas encontram-se distribuídas em 21 estados³², os quais corresponderam por 83,4% da produção de leite no Brasil em 2017 (IBGE, 2017). Sendo que a região Norte concentra 296 propriedades (6,2% do total analisado), Nordeste com 1.993 propriedades (41,8%)³³, Sudeste com 882 propriedades (18,5%), Sul com 776 propriedades (16,3%) e Centro-Oeste com 820 propriedades (17,2% do total analisado). Para efeito de comparação, mas guardadas as diferenças entre as fontes de dados, a distribuição da pecuária leiteira conduzida até 50 hectares de área total, segundo o Censo Agropecuário 2017, era: região

³² O programa ATeG só está presente nos estados em que os Senar Estaduais aderem. Por exemplo, Paraná e São Paulo, importantes estados na produção de leite no Brasil, não estão presentes na análise, pois em 2021 as suas regionais do Senar não participavam do programa. Também, não estão presentes na amostra produtores dos estados de Roraima, Acre, Amapá e Tocantins. Para mais detalhes sobre os municípios, estados e regiões atendidas na ATeG- Senar, consultar o Quadro A1 no Apêndice.

³³ A região Nordeste apresenta o maior número de produtores analisados devido ao Projeto Agronordeste (convênio com a ANATER).

Norte concentrava 6,0% dos estabelecimentos nacionais nesta categoria; Nordeste, 31,4%; Sudeste, 24,3%; Sul, 29,3%; e Centro-Oeste 9,0%, conforme IBGE (2017).

Em relação ao perfil fundiário³⁴ das propriedades de leite consideradas, 61% são caracterizadas como minifúndios – com imóvel rural com área inferior a 1 módulo fiscal (Tabela 3), pois o foco principal do programa é auxiliar produtores rurais das classes C, D e E que não tinham, até adentrarem no Programa em apreço, acesso à assistência técnica e a tecnologias modernas. Segundo o SENAR (2022b), os produtores atendidos pela ATeG são classificados, em sua maioria, como pequenos produtores.

A Tabela 4 mostra as características das propriedades avaliadas. Observa-se que a quantidade média produzida pelas propriedades analisadas foi de aproximadamente 60 mil litros por ano, com uma média de 15 vacas em lactação (ou seja, vacas ordenhadas). O Censo Agropecuário 2017 indica que a média nacional era de 10 vacas ordenhadas por estabelecimentos e produção de 25 mil litros ano (IBGE, 2017).

A área média total das propriedades atendidas na ATeG-Senar em 2021 era de 52 hectares, sendo que as vacas ordenhadas compartilhavam o pasto com o restante do rebanho, havendo, em média 41 cabeças por propriedade atendida no Programa ATeG- Senar. Os pequenos produtores têm importância muito grande na produção de leite. Segundo o Censo Agropecuário de 2017, os estabelecimentos que produziam leite e tinham área total de até 50 hectares representavam 74% do total em 2017 (IBGE, 2017).

Na amostra de produtores de leite da ATeG-Senar (veja Tabela 4), constata-se que o gasto médio despendido com a mão de obra foi de R\$ 23 mil por ano e o valor médio do capital (s/ terra) foi de R\$ 160 mil. A variável capital corresponde à quantidade de bens, máquinas e equipamentos que o produtor possui e utiliza na atividade leiteira, mas não considera o rebanho bovino. Ademais, o gasto médio com suplementação alimentar (sal, ração, etc.) do rebanho das propriedades avaliadas na ATeG-Senar foi de R\$ 54 mil no ano de 2021.

As informações acima indicam que, na amostra de produtores de leite analisada, o gasto médio com suplementação alimentar do rebanho é maior que as despesas com mão de obra, sendo que a alimentação do rebanho se destaca como um dos principais componentes dos custos de produção da pecuária leiteira na amostra analisada³⁵. Segundo Silva e Bragagnolo (2018), à

³⁴ A classificação do perfil fundiário dos produtores de leite assistidos pela ATeG foi definida conforme a Lei 8.629/1993. Essa lei leva em consideração o módulo fiscal, que varia de município para município. Minifúndio é imóvel rural com área inferior a 1 módulo fiscal; pequena propriedade é imóvel com área entre 1 e 4 módulos fiscais; média propriedade é imóvel rural de área superior a 4 e até 15 módulos fiscais; e grande propriedade é imóvel rural com área superior a 15 módulos fiscais.

³⁵ No ano de 2021 o setor passou por elevação nos custos de produção, principalmente com suplementação alimentar devido ao *boom* no preço do milho, componente da ração de bovinos leiteiros.

medida que aumenta a qualidade do alimento oferecido ao rebanho, maior será o custo de produção.

A emissão média de gás metano por propriedade leiteira analisada na amostra da ATeG-Senar, no Brasil, foi de 1.701 kgCO₂eq. Segundo Brasil (2022), a emissão deste gás pelo gado leiteiro ocorre durante o processo de fermentação entérica, que é influenciado, principalmente, por três parâmetros: alimento digerido (a ser apreciado por sua qualidade e quantidade), digestibilidade e sistema de criação animal. No presente trabalho, as emissões foram calculadas com base na produtividade das propriedades, a qual foi, em média, de 3.664 kg/vaca/ano³⁶.

O gasto médio anual com medicamentos para o rebanho das propriedades atendidas pela ATeG-Senar foi de R\$ 2.804. No entanto, há grande dispersão entre os produtores quanto a este gasto, com coeficiente de variação de 279,4%. O valor do capital (sem considerar terra) de que dispõe o produtor na propriedade teve média nacional de R\$ 160.151, mas o seu coeficiente de variação foi de 1.116%. A região Sul é, entre as cinco macrorregiões brasileiras, a que apresenta os maiores valores médios de gastos com medicamentos para o rebanho e valor de capital (sem considerar terra). E os produtores da região Norte são os que apresentam os menores valores médios dessas variáveis. Esses resultados, talvez, já indiquem o uso de distintos pacotes tecnológicos na pecuária leiteira por produtores situados em diferentes regiões do Brasil e justifique a ênfase no cálculo da metafronteira estocástica.

Para explicar e controlar o termo de ineficiência (ver equação 8), utilizaram-se variáveis que caracterizam o produtor e interferem na produção de leite. A idade média do administrador (a) da propriedade é de 56 anos, e o seu nível de escolaridade encontra-se distribuído da seguinte forma: 5% sem escolaridade, 44% com ensino fundamental, 39% com ensino médio, 9% com graduação, e 3% com pós-graduação. Para efeito de comparação, o Censo Agropecuário de 2017 indica que a quantidade de estabelecimentos agropecuários do Brasil com produtores com idade entre 55 e 65 anos era de 23% do total (1,1 milhão de estabelecimentos). Com relação ao nível de escolaridade, o Censo citado informa que 49% dos estabelecimentos agropecuários do Brasil eram administrados por produtores com ensino fundamental (IBGE, 2017), contra 44% em nossa amostra da ATeG-Senar.

Como variável para auxiliar na explicação das diferenças tecnológicas entre os produtores das cinco regiões brasileiras, quando empregado o modelo de metafronteira estocástica, utilizou-se a variável *dummy* referente ao tempo durante o qual a propriedade está recebendo a assistência técnica e gerencial do Senar. Dentre as propriedades analisadas em

³⁶ Para estimação das emissões de metano foi transformada a produtividade de leite em litros para quilos, e usou-se o fator 1 litro = 1,030 kg.

2021, 91% estão a menos de 1 ano recebendo a ATeG e 9% estão recebendo visitas da ATeG a mais de 1 ano. O acesso à assistência técnica permite que os produtores rurais obtenham mais informações sobre as tecnologias disponíveis e sua aplicabilidade de modo a melhorar o desempenho da produção (SENAR, 2022a). Autores como Brito (2016), Alem et al. (2019) e Cele, Hennessy e Thorne (2023) constataram, em seus estudos, que a orientação técnica recebida pelos produtores reduz a ineficiência técnica dos produtores.

Tabela 3 - Distribuição das propriedades que conduzem a pecuária leiteira em 2021 e atendidas pelo ATeG-Senar, conforme perfil fundiário

Perfil Fundiário	Número		Número		Número		Número		Número		Número	
	Propriedades (Brasil)	%	Propriedades (Norte)	%	Propriedades (Nordeste)	%	Propriedades (Sudeste)	%	Propriedades (Sul)	%	Propriedades (Centro-Oeste)	%
Área igual 0	2	0%	0	0%	0	0%	0	0%	2	0%	0	0%
Grande propriedade	32	1%	2	0,7%	12	0,6%	7	0,8%	0	0%	11	1,3%
Média propriedade	261	5%	9	3%	83	4%	103	12%	24	3%	42	5%
Pequena propriedade	1565	33%	147	50%	472	24%	376	43%	401	52%	169	21%
Minifúndio	2907	61%	138	47%	1426	72%	396	45%	349	45%	598	73%
Total	4767	100%	296	100%	1993	100%	882	100%	776	100%	820	100%

Fonte: Elaborada pela autora, a partir de dados do Senar.

Tabela 4 - Características das 4.767 propriedades de pecuária leiteira e atendidas no programa ATeG em 2021

Variáveis	Brasil			Norte			Nordeste			Sudeste			Sul			Centro-Oeste		
	M	DP	CV (%)	M	DP	CV (%)	M	DP	CV (%)	M	DP	CV (%)	M	DP	CV (%)	M	DP	CV (%)
Produção de leite (litros/ano)	60.397	92.685	153,5	22.164	23.701	106,9	33.146	45.848	138,3	70.712	113.853	161,0	140.780	133.383	94,7	53.267	72.696	136,5
Área total da propriedade (ha)	52,4	112,3	214,3	107,6	139	129,2	52,6	121,6	231,2	65,7	139,4	212,2	25,5	20,7	81,2	43,5	84,5	194,3
Gastos com mão de obra (R\$)	23.275	25.128	108,0	15.301	14.142	92,4	19.481	19.591	100,6	29.540	31.906	108,0	32.376	28.311	87,4	20.018	25.021	125,0
Gastos com suplementação alimentar (R\$)	54.568	107.531	197,1	4.682	7.596	162,2	26.873	54.340	202,2	73.363	133.096	181,4	135.755	161.803	119,2	42.839	82.013	191,4
Capital (s/ terra) (R\$)	160.151	1.788.538	1.116	6.428	49.476	769,7	129.300	2.055.117	1.589	200.052	2.078.999	1.039	232.551	1.853.128	796	179.186	651.746	363
Gastos com medicamentos (R\$)	2.804	7.835	279,4	527,83	882,71	167,2	870,86	1.871	214,8	4.005	12.082	301,7	7.417	11.959	161,2	2.666	4.839	181,5
Emissões de metano (kgCO ₂ eq)	1.701	1.753	103,1	1.662	1.772	106,6	1.170	1.212	103,6	2.172	2.484	114,4	2.450	1.464	59,8	1.792	1.749	97,6
Rebanho (cabeças)	41	45	109,8	46	53	115,2	31	39	125,8	53	62	117,0	41	26	63,4	50	46	92,0
Vacas ordenhadas (cabeças)	15	15	100,0	14	15	107,1	10	10	100,0	19	21	110,5	21	13	61,9	15	15	100,0
Produtividade (kg/vaca/ano)	3.664	2.407	65,7	1.679	932	55,5	3.298	2.068	62,7	3.277	2.484	75,8	6.298	2.142	34,0	3.192	1.823	57,1
Amostra	4.767			296			1.993			882			776			820		

Fonte: Elaborada pela autora, a partir de dados do Senar.

Nota: M = média; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação.

Ao se analisar as regiões, percebe-se que a produção média anual de leite das propriedades leiteiras atendidas pela ATeG-Senar é maior nas regiões Sul e Sudeste, assim como o número de vacas ordenhadas, as despesas com suplementação alimentar e com medicamentos. Os produtores da região Sul apresentam os maiores níveis de produtividade, sendo em média de 6.298 kg/vaca/ano. Esse cenário também foi constatado pelo Censo Agropecuário de 2017 para os produtores de leite com até 50 hectares de área total. Segundo esse Censo, a região Sul se destacava com a maior produtividade nacional (3.827 litros/vaca/ano), e a região Sudeste, especialmente o estado de Minas Gerais, se destacava com o maior rebanho de vacas ordenhadas (1,2 milhões de vacas ordenhadas, média de 8 vacas ordenhadas por estabelecimento), ver IBGE (2017).

Na amostra do SENAR, referente a 2021, a região Norte se destaca com a maior área média das propriedades de pecuária leiteira (com 107,6 hectares), mas com as menores despesas com suplementação alimentar do rebanho e com a menor média de produção de leite por propriedade. A região Nordeste apresenta o maior número de propriedades analisadas, as quais apresentam, em média, o menor rebanho de vacas ordenhadas e a menor quantidade de emissões de metano. Para efeito de comparação, de acordo com o Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2017), a região Nordeste concentrava o maior número de estabelecimentos agropecuários que conduziam a bovinocultura leiteira em 2017 e que apresentavam área total de até 50 hectares (273 mil estabelecimentos, correspondendo a 31% do total), e a região Norte apresentava o menor rebanho leiteiro (495 mil de vacas – 8,3% do total nacional) e a menor produção de leite (682 milhões de litros – 4,3% do total nacional).

Percebe-se, ao examinar a Tabela 4, que o desvio-padrão e o coeficiente de variação das variáveis coletadas junto à ATeG-Senar e a serem utilizadas nas estimativas de fronteira estocástica são elevados, tanto para o Brasil como para as suas cinco macrorregiões. Isso reflete o fato de que as propriedades leiteiras analisadas na presente tese apresentam grandes diferenças entre os valores mínimos e máximos para as variáveis que afetam a produção de leite (implicando em alta dispersão desses valores), e, conseqüentemente, isto sugere a presença de heterogeneidade tecnológica entre as propriedades.

Ressalta-se que a heterogeneidade tecnológica é algo marcante na produção brasileira de leite de vaca. Essas diferenças são atreladas aos fatores edafoclimáticos, estrutura das propriedades e às condições econômicas e ambientais regionais (PEREIRA et al., 2016; ZOCCAL; DE SOUZA; GOMES, 2005). Esse cenário é consistente com o observado em outros estudos (tais como os de BRITO, 2016; NASCIMENTO et al., 2012; SILVA; BRAGAGNOLO, 2018).

5.2 Estimativas e seleção do melhor modelo para quantificar a fronteira de produção

Este item se decompõe em dois subitens. Inicialmente, subitem 5.2.1, apresentam-se e analisam-se as similaridades e diferenças entre as estimativas dos seis modelos de fronteira de produção avaliados na Tese. O subitem 5.2.2 apresenta os níveis de eficiência técnica e ambiental, a taxa de metatecnologia e as metaeficiências a partir desses seis modelos e utilizam-se testes *t-student* de diferença de médias para avaliar suas possíveis semelhanças e diferenças estatísticas.

5.2.1 Estimativas das funções estocásticas e da metafronteira

Neste item apresentam-se inicialmente as estimativas de três modelos de fronteira estocástica (Tabelas 5, 6 e 7) cada qual utilizando a forma funcional de Cobb-Douglas ou de Translog. Há, portanto, seis estimativas da fronteira estocástica³⁷, a saber: Modelo I (fronteira de produção simples) com forma funcional Cobb-Douglas ou Translog; Modelo II (fronteira de produção com *dummies* representando as macrorregiões brasileiras) com forma funcional Cobb-Douglas ou Translog; e, Modelo III (metafronteira de produção) com forma funcional Cobb-Douglas ou Translog.

Os testes de razão de verossimilhança, Critério de Informação de *Akaike* (AIC) e o Critério Bayesiano de *Schwarz* (BIC) indicam, de maneira geral, que a fronteira de produção com uso da forma funcional Translog é a mais adequada para estimar as três abordagens de fronteira estocástica. Entretanto, devido às diferenças nos sinais, nos valores e na significância estatística dos coeficientes estimados, os resultados para as duas formas funcionais (Cobb-Douglas e Translog) são expostos a fim de identificar se há também diferença nos escores de eficiência. Os parâmetros foram obtidos via o método de máxima verossimilhança e estimados com uma distribuição normal truncada.

O teste da razão de verossimilhança (LR), ao nível de 1% de significância, e os critérios AIC e BIC (ver Tabelas A1 e A2 do Apêndice) levam a rejeitar a hipótese nula de que a estimativa por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) é a mais adequada para relacionar os dados, indicando o uso dos modelos de fronteira estocástica. Também, foi realizado o teste razão de verossimilhança (LR) sobre a presença de ineficiência, o qual não aceitou a hipótese

³⁷ A partir de cada um desses seis modelos serão apresentados (no item 5.2.2) os escores de eficiência e metaeficiência técnica e ambiental (Tabela 8) para uma amostra de pequenos produtores atendidos pelo ATeG-Senar, e referentes ao ano de 2021.

nula, ao nível de 1% de significância, de que nos modelos estimados não há componente de ineficiência técnica (para mais detalhes, consultar a Tabela A3 do Apêndice).

Validada a presença de ineficiência, foi incorporado na estimação das fronteiras estocásticas o vetor de variáveis que explicam a ineficiência técnica das propriedades, de forma a obter os escores de eficiência técnica sem possível viés. O teste de razão de verossimilhança (LR) rejeita a hipótese nula, ao nível de 1% de significância, de que as fronteiras estocásticas com uso da forma funcional Cobb-Douglas e a Translog são as adequadas a serem usadas, portanto, devem ser estimadas as fronteiras estocásticas com ineficiência técnica. Diante disso, estimam-se as três abordagens (fronteira estocástica simples, fronteira estocástica simples com *dummies* regionais e metafronteira estocástica) usando o vetor com as variáveis despesas com medicamento, escolaridade e idade para explicar a ineficiência (ver Tabelas A1 e A2 do Apêndice).

Os resultados obtidos pelos modelos de fronteira estocástica simples (Modelo I) e de fronteira estocástica com *dummies* para considerar as regiões do Brasil (Modelo II), usando alternativamente a forma funcional Cobb-Douglas e a Translog com vetor de variáveis de ineficiência, são apresentados na Tabela 5. Todas as variáveis foram transformadas em logaritmo natural. Dessa forma, os coeficientes obtidos referem-se às elasticidades e são interpretados em termos percentuais (exceto os coeficientes relacionados às variáveis escolaridade e idade).

Ressalta-se que o uso de variáveis *dummies* para considerar as regiões brasileiras faz com que o Modelo II apresente $n-1$ *dummies*. A região Sul é considerada grupo base, estando associada ao intercepto do modelo (a constante), e sendo comparada com as demais regiões brasileiras (Modelo II - Tabela 5).

Na Tabela 5, referente ao Modelo II, percebe-se que os coeficientes associados às regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste, incluídas no modelo como *dummies*, apresentam sinais negativos e são estatisticamente significantes ao nível de 1%, em ambas as formas funcionais estimadas (Cobb-Douglas e Translog). Esse resultado indica que os pequenos produtores atendidos pela ATeG-Senar em 2021 e situados nas demais regiões do Brasil, quando comparados com os situados na região Sul, apresentam, em média, menores níveis de produção de leite quando se usam as mesmas quantidades de insumos. Isto condiz com os dados do Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2017), que mostram que os estabelecimentos agropecuários com maior produtividade de leite e que apresentaram área total de até 50 hectares estavam localizados nos estados do Rio Grande do Sul (obtendo produtividade de 4.051

litros/vaca/ano), em Santa Catarina (com 3.943 litros/vaca/ano) e no Paraná (com 3.471 litros/vaca/ano).

Tabela 5 – Resultados da fronteira estocástica – variável dependente é produção de leite

Variáveis	Fronteira Estocástica Simples (Modelo I)				Fronteira Estocástica com <i>Dummy</i> (Modelo II)			
	Translog		Cobb-Douglas		Translog		Cobb-Douglas	
	Coefficiente	Erro Padrão	Coefficiente	Erro Padrão	Coefficiente	Erro Padrão	Coefficiente	Erro Padrão
Fronteira de Produção								
Área Total	0,087661 ^{NS}	0,0713073	-0,078219*	0,007193	0,0220849 ^{NS}	0,0693422	-0,0356126*	0,0072729
Mão de Obra	-0,2367939*	0,077488	0,1365045*	0,0100439	-0,2438761*	0,0743723	0,1278482*	0,0097193
Despesas com Suplementação	0,329732*	0,0481271	0,2608135*	0,0043331	0,3384821*	0,0466627	0,2421817*	0,0043556
Capital	-0,022589***	0,0129424	0,0011491 ^{NS}	0,0011077	-0,0269608**	0,0124406	-0,002743**	0,0011071
Emissões de CH ₄	0,161034***	0,0909186	0,7201508*	0,0107546	0,1370779 ^{NS}	0,087667	0,7080018*	0,0105836
Área Total ao quadrado	-0,021007**	0,0088119			-0,0193427**	0,0084953		
Mão de Obra ao quadrado	0,0493491*	0,0121776			0,0501043*	0,0118103		
Despesas com Suplementação ao quadrado	0,1092118*	0,0042642			0,1033338*	0,0042302		
Capital ao quadrado	-0,0005576 ^{NS}	0,0010969			0,001429 ^{NS}	0,0010586		
Emissões de CH ₄ ao quadrado	0,1323733*	0,0195297			0,1459425*	0,0189287		
Área Total X Mão de Obra	0,0152442 ^{NS}	0,0099377			0,0154827 ^{NS}	0,0096279		
Área Total X Despesas com Suplementação	0,0046407 ^{NS}	0,0049228			0,0088416***	0,0048478		
Área Total X Capital	0,000055 ^{NS}	0,0011311			0,0002883 ^{NS}	0,0010916		
Área Total X Emissões de CH ₄	-0,0372936*	0,0117265			-0,0307713*	0,0113304		
Mão de Obra X Despesas com Suplementação	-0,0501549*	0,0065564			-0,0458299*	0,0064518		
Mão de Obra X Capital	-0,0006036 ^{NS}	0,0017305			0,0006302 ^{NS}	0,001674		
Mão de Obra X Emissões de CH ₄	0,0432154*	0,0121678			0,036705*	0,0119282		
Despesas com Suplementação X Capital	0,0026731*	0,0007972			0,0013194***	0,0007792		
Despesas com Suplementação X Emissões de CH ₄	-0,0809447*	0,0070032			-0,0841832*	0,0067683		
Capital X Emissões de CH ₄	0,0007603 ^{NS}	0,0019033			-0,0007165 ^{NS}	0,0018396		
Norte					-0,324469*	0,0307302	-0,4344482*	0,0333344
Nordeste					-0,2127291*	0,0178476	-0,2765584*	0,019859
Sudeste					-0,3593748*	0,0184945	-0,4547849*	0,0204106
Centro-Oeste					-0,157885*	0,0194123	-0,3020124*	0,0207334
Constante	5,037179*	0,3841242	1,913722*	0,0757842	5,482586*	0,3688426	2,406315*	0,0799015
Variáveis explicativas da Ineficiência Técnica								
Despesas com Medicamentos	-6,707831*	2,440384	-6,284513*	2,170121	-7,156322*	2,208454	-7,130409**	3,115278
Idade	1,88397*	0,66563	1,844523*	0,6083344	1,767936*	0,5346283	1,620396**	0,688441
Escolaridade	7,587031 ^{NS}	5,954504	8,286549 ^{NS}	6,604478	7,757338 ^{NS}	5,80312	7,686386 ^{NS}	7,068412
Constante	-218,9166*	76,05414	-222,4735*	7,105821	-210,147*	61,5503	-204,7398**	85,21091
U_{sigma}								
Constante	3,689134*	0,3420859	3,683985*	0,3130261	3,675298*	0,2863934	3,656449*	0,4121159
V_{sigma}								
Constante	-2,517835*	0,0352989	-2,100672*	0,032355	-2,629247*	0,0357161	-2,229281*	0,0322312
sigma_u	6,32536*	1,081908	6,309097*	0,987456	6,281751*	0,8995259	6,222829*	1,282263
sigma_v	0,2839612*	0,0050118	0,3498203*	0,0056592	0,2685754*	0,0047962	0,328033*	0,005286
Lambda	22,27544*	1,08208	18,03525*	0,987741	23,38915*	0,8997324	18,97012*	1,282433
Log likelihood	-2204,784		-2794,016		-2013,254		-2546,660	
Observações	4.767		4.767		4.767		4.767	

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações econométricas.

Significância: Estatisticamente significativa nos intervalos de confiança de * 99%, ** 95% e *** 90%, ^{NS} não significativo.

As estimativas dos Modelos I e II (Tabela 5) utilizando as formas funcionais Translog e Cobb-Douglas não geram, necessariamente, os mesmos resultados quanto aos sinais, magnitudes e significância estatística dos coeficientes obtidos. A fronteira estocástica simples (Modelo I) estimada com a forma funcional Cobb-Douglas apresenta sinais para os coeficientes mais alinhados com o esperado na literatura econômica – ou seja, sinal positivo para os coeficientes associados aos insumos trabalho e capital (exceto terra). No entanto, nem todos os coeficientes são estatisticamente significativos. Por outro lado, utilizando a fronteira estocástica simples, mas a forma funcional Translog, os coeficientes associados a algumas variáveis apresentam sinais inversos aos obtidos usando a função Cobb-Douglas (como, por exemplo, mão de obra e capital), o que pode estar atrelado à propriedade da Translog em captar as relações entre os insumos – se são insumos substitutos ou complementares entre si. Para Brito (2016), a grande diferença entre as estimativas usando as formas funcionais Translog e Cobb-Douglas está no fato de a Translog possibilitar a análise das inter-relações dos insumos de produção. Além disso, os cruzamentos entre as variáveis são necessários para entender o impacto na produção de leite e para estimar a eficiência ambiental, que considera as relações do insumo ambiental (CH₄) com os demais insumos da função de produção³⁸.

A fronteira estocástica com *dummies* regionais (Modelo II – Tabela 5), estimada com a forma funcional Cobb-Douglas, apresenta coeficiente com sinal positivo para o insumo trabalho, despesas com suplementação alimentar e emissões de CH₄, sendo que os coeficientes associados às variáveis terra e capital apresentam sinal negativo. Para o mesmo Modelo II, mas usando a forma funcional Translog, também se percebe que alguns coeficientes apresentam sinais inversos aos propostos pela teoria econômica (como, por exemplo, mão de obra e capital). Isto, novamente, pode estar relacionado à sua propriedade de captar os cruzamentos entre as variáveis e identificar se essas relações são entre insumos substitutos ou complementares. Por exemplo, o coeficiente positivo do cruzamento entre a variável suplementação alimentar e capital (quando estatisticamente significativo) indica que ambos são bens complementares, sendo que com mais investimentos em máquinas e equipamentos o produtor conseguirá produzir suplementação alimentar (por exemplo, ração/feno animal) para o seu rebanho em sua propriedade.

³⁸ Para mais detalhes sobre a estimação da eficiência ambiental, ver equação (15).

Para obter o Modelo III, realizaram-se, inicialmente, a estimação das dez³⁹ fronteiras estocásticas de forma separada (referentes aos produtores de leite das cinco macrorregiões brasileiras, com uso das formas funcionais Cobb-Douglas e Translog) e o teste para verificar se os grupos apresentam diferenças tecnológicas. Procede-se desta forma a fim de identificar a potencial presença de heterogeneidade de adoção de tecnologia entre os produtores de leite das diferentes regiões brasileiras e, assim, fazer a estimação da metafronteira estocástica. Utilizando o teste proposto por Battese, Rao e O'Donnell (2004), equação (20) no item 4.2.3, não se aceita a hipótese nula (H_0), ao nível de 1% de significância estatística, de que as fronteiras de produção dos grupos de propriedades são as mesmas (ver Tabela A4 do Apêndice). Portanto, há heterogeneidade na tecnologia produtiva empregada nas propriedades localizadas em diferentes regiões brasileiras e isto sugere que qualquer comparação de eficiência entre as cinco regiões deva ser realizada em relação à metafronteira estocástica.

Com esse resultado de heterogeneidade, realiza-se a análise da metafronteira dos produtores de leite, seguindo a metodologia proposta por Huang, Huang e Liu (2014), Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) e Abdulai e Abdulai (2017). Utilizaram-se as formas funcionais Cobb-Douglas e Translog e o vetor variáveis que explicam a ineficiência (ver Tabelas A1 e A2 do Apêndice). A Tabela 6 e a Tabela 7 apresentam os resultados do modelo de fronteira estocástica para os grupos produtores de leite de cada macrorregião brasileira, e que são necessários para a estimação da metafronteira (como ilustrado na Figura 3 do item 4.1). A metafronteira, além de apresentar os coeficientes da função de produção, permite calcular o *gap* tecnológico entre a fronteira estocástica de cada grupo de produtores de leite e a metafronteira. As variáveis foram transformadas em logaritmo natural (exceto escolaridade, idade e a variável *dummy* referente ao tempo de recebimento de ATeG).

As estimativas do Modelo III utilizando as formas funcionais Cobb-Douglas e Translog, e apresentadas nas Tabelas 6 e 7, respectivamente, evidenciam que as fronteiras estocásticas dos produtores de leite de cada região brasileira apresentam diferenças quanto aos sinais, magnitudes e significância estatística dos coeficientes obtidos. Observa-se, como constatado pelo teste proposto por Battese, Rao e O'Donnell (2004), que as fronteiras de produção dos grupos de propriedades são diferentes, corroborando com a pressuposição desta tese de que os níveis tecnológicos dos pequenos produtores de leite no Brasil são heterogêneos. Por exemplo, os coeficientes da variável área total e capital no modelo Cobb-Douglas (Tabela 6), as regiões

³⁹ As dez estimativas referem-se às cinco estimativas de fronteira estocástica de cada macrorregião brasileira usando forma funcional Translog e às cinco estimativas de fronteira estocástica de cada macrorregião usando forma funcional Cobb-Douglas.

Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste apresentam sinal negativo e a região Sul sinal positivo. No modelo Translog (Tabela 7), por exemplo, somente a região Centro-Oeste apresenta coeficiente de área total com sinal negativo, e os coeficientes da variável mão de obra apresentaram sinal positivo para as estimativas das regiões Norte, Sul e Centro-Oeste e com sinal negativo para as regiões Nordeste e Sudeste.

Tabela 6 - Resultados da metafronteira estocástica (Modelo III) – usando Cobb-Douglas – variável dependente é produção de leite

Variáveis	Norte		Nordeste		Sudeste		Sul		Centro-Oeste		Metafronteira	
	Coefficiente	Erro Padrão	Coefficiente	Erro Padrão	Coefficiente	Erro Padrão	Coefficiente	Erro Padrão	Coefficiente	Erro Padrão	Coefficiente	Erro Padrão
Fronteira de Produção												
Área Total	-0,0747376*	0,0263652	-0,048350*	0,011004	-0,035016**	0,016177	0,055758*	0,014838	-0,0144508 ^{NS}	0,018677	-0,0732253*	0,002570
Mão de Obra	0,2077253*	0,0368767	0,117250*	0,015671	0,175666*	0,027101	0,135854*	0,017208	0,1167291*	0,021136	0,1331961*	0,003583
Capital	-0,0417271*	0,0096021	-0,00402***	0,002083	-0,003139 ^{NS}	0,002235	0,001570 ^{NS}	0,001502	-0,0060305**	0,002341	0,0009414**	0,00044
Despesas com Suplementação	0,1541122*	0,0177661	0,222208*	0,006004	0,280771*	0,011869	0,277985*	0,014395	0,2686756*	0,013025	0,2554624*	0,001614
Emissões de CH ₄	0,7930303*	0,0302397	0,670420*	0,016731	0,748837*	0,024783	0,770785*	0,028929	0,6250396*	0,028026	0,7133595*	0,003918
Constante	1,484227*	0,278046	2,715147*	0,118582	0,767893*	0,204183	107,567*	0,159529	2,523497*	0,175375	2,094758*	0,028091
Variáveis explicativas da Ineficiência Técnica												
Despesas com Medicamentos	-6,550676 ^{NS}	12,98766	-4,03902 ^{NS}	2,771665	-8,368.954 ^{NS}	9,911234	-6,18149***	3,714123	-13,47119 ^{NS}	22,61658		
Idade	1,546 ^{NS}	3,065583	2,51826***	1,263275	1,788078 ^{NS}	2,133848	0,960930 ^{NS}	0,624977	0,2551679 ^{NS}	0,727245		
Escolaridade	-37,11437 ^{NS}	78,88206	31,1936***	18,76403	6,853252 ^{NS}	15,93256	28,37491 ^{NS}	19,03553	-41,61485 ^{NS}	71,45443		
Tempo ATeG											-0,0488905 ^{NS}	0,125546
Constante	-210,221 ^{NS}	404,4143	-325,1844**	157,7359	-200,6212 ^{NS}	238,0265	-106,2292 ^{NS}	66,266	-87,61648 ^{NS}	154,4158	-0,5020471 ^{NS}	0,748410
U_{sigma}												
Constante	3,722884**	1,902746	3,970181*	0,478573	3,559867*	1,16442	2,626857	0,581607	3,888155**	1,672758	-2,961677*	1,007165
V_{sigma}												
Constante	-2,607595*	0,1444327	-2,019895*	0,049581	-2,259658*	0,076449	-3,368153	0,081280	-2,436618*	0,099829	-3,996125*	0,062570
sigma_u	6,433005 ^{NS}	6,120186	7,279707*	1,741938	5,929463***	3,452192	3,718903	1,08147	6,987183 ^{NS}	5,843934	0,2274469**	0,114538
sigma_v	0,2714988*	0,0196067	0,364238*	0,009029	0,3230885*	0,012349	0,1856158	0,007543	0,2957299*	0,014761	0,1355978*	0,004242
Lambda	23,69441*	6,120618	19,98612*	1,742365	18,35244*	3,452495	20,03549	1,081889	23,62691*	5,844086	1,677365*	0,112750
Log likelihood		-124,450		-1274,627		-443,9654		13,4285		-387,303		2169,0552
Observações		296		1.993		882		776		820		4767

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações econométricas.

Significância: Estatisticamente significativa nos intervalos de confiança de * 99%, ** 95% e *** 90%, ^{NS} não significativo.

Nota: Na metafronteira não é incorporado as variáveis que explicam a ineficiência (despesa com medicamentos, idade e escolaridade), pois elas são inseridas nas estimativas de fronteira estocástica de cada macrorregião.

Tabela 7 - Resultados da metafronteira estocástica (Modelo III) – usando Translog – variável dependente é produção de leite

Variáveis	Norte		Nordeste		Sudeste		Sul		Centro-Oeste		Metafronteira	
	Coefficiente	Erro Padrão	Coefficiente	Erro Padrão								
Fronteira de Produção												
Área Total	0,4640112 ^{NS}	0,31452	0,0259742 ^{NS}	0,10396	0,2201539 ^{NS}	0,21721	0,0343977 ^{NS}	0,25691	-0,0281447 ^{NS}	0,18843	0,0069986 ^{NS}	0,02877
Mão de Obra	0,4748633 ^{NS}	0,63118	-0,2000693 ^{NS}	0,12203	-0,8592256 ^{**}	0,38185	0,0090364 ^{NS}	0,33400	0,1538775 ^{NS}	0,18819	-0,2146202 [*]	0,03203
Despesas com Suplementação	0,4762934 ^{***}	0,28111	0,4231963 [*]	0,07620	0,2856491 ^{***}	0,17091	0,7485077 [*]	0,21272	0,1150734 ^{NS}	0,15149	0,3370262 [*]	0,01941
Capital	-0,0883638 ^{NS}	0,18596	-0,0201082 ^{NS}	0,02264	-0,0440993 ^{NS}	0,03067	-0,051859 ^{***}	0,02746	-0,0364159 ^{NS}	0,02546	-0,0089702 ^{***}	0,00524
Emissões de CH ₄	0,4116931 ^{NS}	0,37043	-0,1076362 ^{NS}	0,12982	1,59631 [*]	0,32682	0,7313876 ^{***}	0,43162	0,0727575 ^{NS}	0,32654	0,0831694 ^{**}	0,03508
Área Total ao quadrado	-0,1026252 ^{**}	0,04015	-0,0219122 ^{NS}	0,01334	0,0277352 ^{NS}	0,01934	-0,0104917 ^{NS}	0,02599	0,008029 ^{NS}	0,02538	-0,0223227 [*]	0,00365
Mão de Obra ao quadrado	0,0046242 ^{NS}	0,10292	0,0246703 ^{NS}	0,01560	0,2201169 [*]	0,06069	0,047687 ^{NS}	0,04722	-0,0006621 ^{NS}	0,02244	0,0351482 [*]	0,00490
Despesas com Suplementação ao quadrado	0,069316 [*]	0,02507	0,1037096 [*]	0,00575	0,1558336 [*]	0,01354	0,3151794 [*]	0,02730	0,1393831 [*]	0,01780	0,1036983 [*]	0,00155
Capital ao quadrado	0,0102946 ^{NS}	0,01320	-0,0000481 ^{NS}	0,00172	0,0037142 ^{NS}	0,00310	0,0016985 ^{NS}	0,00144	-0,0016955 ^{NS}	0,00212	-0,0006886 ^{NS}	0,00046
Emissões de CH ₄ ao quadrado	0,0245525 ^{NS}	0,06215	0,1203679 [*]	0,02906	0,2372986 [*]	0,04719	0,5516744 [*]	0,10779	0,104279 [*]	0,04950	0,1176236 [*]	0,00761
Área Total X Mão de Obra	-0,0216122 ^{NS}	0,04322	0,0320785 ^{**}	0,01418	-0,0017494 ^{NS}	0,03043	0,0168194 ^{NS}	0,02793	0,0601816 ^{**}	0,02418	0,0217702 [*]	0,00402
Área Total X Despesas com Suplementação	-0,017657 ^{NS}	0,02387	0,0013179 ^{NS}	0,00687	0,0120075 ^{NS}	0,01267	0,0710709 [*]	0,02316	-0,033437 ^{***}	0,01777	0,0067392 [*]	0,00195
Área Total X Capital	-0,0016282 ^{NS}	0,01747	0,0045718 ^{**}	0,00192	-0,0030913 ^{NS}	0,00242	-0,0057408 ^{**}	0,00261	-0,003793 ^{NS}	0,00297	0,0009644 ^{**}	0,00046
Área Total X Emissões de CH ₄	0,0367328 ^{NS}	0,04023	-0,0474636 [*]	0,01754	-0,0615354 ^{NS}	0,02891	-0,1159613 ^{**}	0,05179	-0,0302043 ^{NS}	0,03504	-0,0373543 [*]	0,00450
Mão de Obra X Despesas com Suplementação	-0,0575919 ^{NS}	0,03589	-0,057842 [*]	0,01026	-0,0487818 ^{**}	0,02335	-0,0932135 [*]	0,02299	-0,0548553 [*]	0,01957	-0,050573 [*]	0,00256
Mão de Obra X Capital	0,0132823 ^{NS}	0,03421	0,0014203 ^{NS}	0,00304	0,0045681 ^{NS}	0,00441	0,0008438 ^{NS}	0,00304	-0,0118305 [*]	0,00337	-0,0021835 [*]	0,00071
Mão de Obra X Emissões de CH ₄	0,0293774 ^{NS}	0,05628	0,0772142 [*]	0,01745	-0,1012834 ^{**}	0,04521	0,0791012 ^{NS}	0,05352	0,0458004 ^{NS}	0,03714	0,0575858 [*]	0,00471
Despesas com Suplementação X Capital	-0,0073285 ^{NS}	0,01136	0,003626 [*]	0,00129	0,0006246 ^{NS}	0,00200	-0,0010163 ^{NS}	0,00252	0,00139 ^{NS}	0,00213	0,0023985 [*]	0,00033
Despesas com Suplementação X Emissões de CH ₄	-0,0308818 ^{NS}	0,02963	-0,076176 ^{***}	0,00979	-0,1419531 [*]	0,02135	-0,4212839 [*]	0,04830	-0,0747567 [*]	0,02174	-0,0765006 [*]	0,00274
Capital X Emissões de CH ₄	-0,0126078 ^{NS}	0,03451	-0,006463 ^{***}	0,00342	-0,0030762 ^{NS}	0,00420	0,0080066 ^{NS}	0,00508	0,0212598 [*]	0,00475	0,001066 ^{NS}	0,00076
Constante	-0,8211403 ^{NS}	2,23197	5,467581 [*]	0,64310	2,432461 [*]	1,417151	-0,5887422 ^{NS}	1,52590	5,395864 [*]	1,14972	5,415986 [*]	0,15846
Variáveis explicativas da Ineficiência Técnica												
Despesas com Medicamentos	-6,887891 ^{NS}	13,55299	-3,651864 ^{NS}	2,769367	-9,743841 ^{NS}	7,079283	-7,044486 ^{**}	3,02929	-0,5825674 ^{NS}	0,5948936		
Idade	1,43664 ^{NS}	2,869747	2,681237 ^{**}	1,597081	1,650931 ^{NS}	1,219282	0,8385878 ^{***}	0,44762	0,0232836 ^{NS}	0,0301012		
Escolaridade	-35,55017 ^{NS}	75,95003	26,48384 ^{NS}	18,28103	15,98849 ^{NS}	17,88167	28,67477 ^{***}	14,9136	-1,419808 ^{NS}	1,569853		
Tempo ATeG											-13,65301 ^{**}	5,681781
Constante	-201,7876 ^{NS}	388,4315	-322,7278 ^{***}	190,0676	-205,1952	145,1303	-99,55994 ^{**}	45,9382	-2,408755 ^{NS}	4,187187	-2,099852 [*]	0,411769
Usigma												
Constante	3,69523 ^{***}	1,900615	3,889371 [*]	0,5840885	3,742067	0,6832485	2,699217 [*]	0,40104	0,7426345 ^{NS}	1,087508	-1,735651 [*]	0,1888538
Vsigma												
Constante	-2,723642 [*]	0,1532154	-2,44283 [*]	0,0543544	-2,726153	0,0810779	-3,718669 [*]	0,08537	-3,230753 [*]	0,178433	-4,022334 [*]	0,030117
sigma_u	6,34467 ^{NS}	6,029388	6,991434 [*]	2,041808	6,495006	2,218852	3,855915 [*]	0,77319	1,449643 ^{***}	0,788249	0,4198636 [*]	0,0396464
sigma_v	0,2561938 [*]	0,0196264	0,2948127 [*]	0,0080122	0,2558724	0,0103728	0,1557763 [*]	0,00664	0,1988158 [*]	0,017737	0,1338324 [*]	0,0020153
Lambda	24,76512 [*]	6,029942	23,71483 [*]	2,042063	25,38377	2,219261	24,7529 [*]	0,77369	7,291387 [*]	0,779900	3,137234 [*]	0,0401352
Log likelihood		-112,166		-998,678								2230,626
Observações		296		1.993								4767

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações econométricas.

Significância: Estatisticamente significativa nos intervalos de confiança de *99%, ** 95% e *** 90%, ^{NS} não significativo.

As estimativas dos Modelos I, II e III usando a forma funcional Cobb-Douglas não geram, necessariamente coeficientes das variáveis com os mesmos sinais e níveis de significância estatística quando estimados usando a forma funcional Translog.

Nos Modelos I, II e III estimados com o uso da forma funcional Cobb-Douglas (Tabelas 5 e 6 – exceto a estimativa do Modelo III para a região Sul), o coeficiente associado à variável área total apresentou sinal negativo, sugerindo que reduções na área da propriedade aumentam a produção de leite. A redução da área decorre dos ganhos de produtividade da terra, ou seja, pastagens de melhor qualidade e uso de concentrados na alimentação do rebanho permitem maior produção de leite com menor área de pastagem (BRITO, 2016; NASCIMENTO et al., 2012; SILVA; BRAGAGNOLO, 2018). Nos Modelos I, II e III utilizando a Translog, o coeficiente associado à variável área total tem sinal positivo, mas não é estatisticamente significativo.

Uma das variáveis com maior impacto positivo na elasticidade total da produção de leite, segundo os resultados dos Modelos I, II e III e assumindo a forma funcional da Translog, é a referente às despesas com suplementação alimentar do rebanho, que foi estatisticamente significativa ao nível de 1% em todos os modelos estimados (ver Tabelas 5 e 7). As despesas médias anuais com suplementação alimentar (sal, ração, etc.) do rebanho foram avaliadas em R\$ 54 mil por propriedade (ver Tabela 4). Trata-se do maior gasto individual das propriedades e um dos principais componentes dos custos de produção da pecuária leiteira. Este resultado é consistente com outros estudos (tais como os de MOREIRA; BRAVO-URETA, 2010; NASCIMENTO et al., 2012; SILVA; BRAGAGNOLO, 2018). Sendo que Silva e Bragagnolo (2018) destacam que a qualidade do alimento oferecido ao rebanho interfere diretamente na quantidade e qualidade do leite produzido.

Os coeficientes associados à variável emissões de CH₄, considerada no modelo como variável ambiental indesejada, apresentam, de modo geral, relação positiva com a produção de leite em todas os modelos estimados (na fronteira estocástica simples, na fronteira estocástica com *dummies* e na metafronteira, ver Tabelas 5, 6 e 7). Isto indica que é impossível ocorrer produção de leite sem que alguma quantidade de metano seja emitida pelas vacas. Reinhard, Lovell e Thijssen (1999), Dayananda (2016) e Silva e Bragagnolo (2018) também identificaram esta relação positiva entre a variável ambiental indesejada e a quantidade de leite produzida.

Nos modelos estimados com a forma funcional Translog (Tabelas 5 e 7), os coeficientes de primeira ordem associados à variável capital apresentam sinal negativo. Entretanto, ao se analisar a interação desta variável (capital) com as demais variáveis é possível identificar, quando o coeficiente desta interação é estatisticamente significativa, a relação positiva da

variável capital com suplementação alimentar e com a área total, pois eles são insumos complementares que elevam a produção de leite. Por outro lado, os modelos citados indicam que os coeficientes de interação entre capital e mão de obra, quando estatisticamente significativos, apresentam sinal negativo – indicando eles serem insumos substitutos. Ou seja, quanto mais máquinas e equipamentos menos pessoas o produtor irá precisar no processo de produção do leite.

Ressalta-se que a variável capital considera a quantidade de bens, máquinas e equipamentos que o produtor possui e utiliza na atividade leiteira, não considerando o rebanho bovino, seu principal recurso utilizado para a produção leiteira. Dessa forma, a variável capital nas propriedades leiteiras analisadas corresponde, por exemplo, ao tanque de expansão para resfriamento do leite, as ordenhadeiras, benfeitorias, máquinas e equipamentos utilizados para produção de silagem e no manuseio das pastagens.

Nos Modelos I, II e III e usando a forma funcional Translog (ver Tabelas 5 e 7) os coeficientes de primeira ordem associados à variável mão de obra, quando estatisticamente significativos, também apresentam sinal negativo. No entanto, quando analisada a interação da mão de obra com a área total, seus coeficientes (quando estatisticamente significativos) têm sinal positivo, indicando-os (mão de obra e área total) serem insumos complementares – ou seja, quanto maior é a área total mais mão de obra será necessária devido à necessidade de maior cuidado com a pastagem. No entanto, os coeficientes de interação entre a mão de obra e a suplementação alimentar (também quando estatisticamente significativos) são negativos, indicando que são bens substitutos. Pois, com mais suplementação alimentar (sal, ração, etc) menos mão de obra será necessária para conduzir as atividades vinculadas à produção de leite, tais como o pastejo rotacionado do rebanho leiteiro. Brito (2016) Cuesta (2000) e Moreira e Bravo-Ureta (2010), ao estimarem os modelos de fronteiras estocástica Translog, também identificaram comportamentos de interações de mão de obra e do capital com área e suplementação alimentar.

Por meio da soma das elasticidades dos fatores produtivos (área, mão de obra, capital e suplementação alimentar) foi identificado o retorno à escala da função de produção. Fica evidente – a partir dos resultados mostrados nas Tabelas 5, 6 e 7 – que a pecuária leiteira em pequenas propriedades assistidas pelo Senar é caracterizada por retornos decrescentes à escala. Por exemplo, nas estimativas usando a função Cobb-Douglas obteve: Modelo I - Brasil (Tabela 5) a soma das elasticidades foi de 0,320; no Modelo II – Brasil com *dummies* (Tabela 5) a soma das elasticidades foi de 0,332; e no Modelo III – metafronteira (Tabela 6) a soma das elasticidades foi de 0,245 para região Norte, de 0,287 para região Nordeste, de 0,418 para região

Sudeste, de 0,471 para região Sul, de 0,365 para região Centro-Oeste e para a metafronteira a soma foi de 0,316. Esses resultados são consistentes com o encontrado por Cele, Hennessy e Thorne (2023), que encontraram, também, retornos decrescentes nas estimativas de fronteira estocástica realizadas para as regiões da Irlanda.

Os coeficientes associados às variáveis explicativas do termo de ineficiência técnica dos pequenos produtores de leite analisados (Modelos I, II e III) indicam, quando estatisticamente significativos, que aumentos nas despesas com medicamentos (que apresente coeficiente com sinal negativo) reduzem a ineficiência técnica dos produtores de leite, e que quanto maior é a idade do produtor (coeficiente com sinal positivo) maior é a ineficiência técnica, pois quanto maior a idade do produtor menor tende a ser a sua adesão a novas tecnologias; estando ambas as variáveis com sinais dos coeficientes em conformidade ao que foi esperado e similar ao que foi observado por Brito (2016), Travassos et al. (2016), Reinhard, Lovell e Thijssen (2002) Urdiales, Lansink e Wall (2016). O coeficiente associado à variável que mensura escolaridade não foi, na maioria das regressões, estatisticamente significativo (ver Tabelas 5, 6 e 7).

Na estimativa da metafronteira estocástica (Tabelas 6 e 7), a variável *dummy* referente ao tempo durante o qual a propriedade está recebendo a ATeG foi utilizada para explicar o *gap* tecnológico entre os grupos de produtores de leite de diferentes regiões. O coeficiente associado a esta variável apresenta sinal negativo (mas sendo apenas estatisticamente significativo no Modelo III com uso da função Translog) indicando que quanto mais tempo os pequenos produtores de leite recebem a ATeG menor é a heterogeneidade tecnológica entre eles nas diferentes regiões brasileiras. Os pequenos produtores de leite, ao receberem assistência técnica, melhoram seus índices zootécnicos (por exemplo, de bem-estar, de manejo nutricional e sanitários dos animais, de boas práticas na ordenha) refletindo em qualidade e quantidade de leite maior (SENAR, 2022a).

Até o presente momento não é possível fazer uma escolha de qual dos seis modelos apresentados nas Tabelas 5, 6, e 7 possa ser escolhido. Por isso, as eficiências técnicas e ambiental a partir desses seis modelos são estimados e suas possíveis diferenças são avaliadas no próximo item, o que permitirá uma escolha entre os modelos avaliados para proceder à avaliação das diferenças regionais entre as eficiências técnica e ambiental das pequenas propriedades leiteiras do Brasil e das relações entre essas eficiências⁴⁰.

⁴⁰ Ressalta-se que caso seja selecionado para atingir este propósito o Modelo III com Translog, serão consideradas as metaeficiências técnica e ambiental (ver equações (18) e (19)).

5.2.2 Valores das eficiências técnica e ambiental, da taxa de metatecnologia e das metaeficiências calculados por diferentes modelos de fronteira estocástica e através da metafronteira

A partir das estimativas das fronteiras estocásticas dos três modelos (Tabelas 5, 6 e 7) obtêm-se os níveis de eficiência técnica e ambiental, a taxa de metatecnologia e as metaeficiências que são apresentados na Tabela 8. Ressalta-se que os escores de eficiência ambiental⁴¹ (equação 15) e da metaeficiência ambiental (equação 19) somente são obtidos para os modelos com forma funcional Translog. Também são apresentados na Tabela 8 os valores médios da taxa de metatecnologia – MTR (que representa o *gap* tecnológico), a qual é utilizada para calcular as metaeficiências técnica e ambiental (equações 18 e 19, respectivamente).

Tabela 8 - Valores médios das eficiências técnica e ambiental, da taxa de metatecnologia e das metaeficiências para o Brasil e suas regiões

Modelo	Indicador	Translog					
		Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
Modelo I (Fronteira Estocástica Simples)	Eficiência técnica	0,789	0,754	0,782	0,745	0,857	0,803
	Eficiência ambiental	0,674	0,669	0,661	0,612	0,754	0,696
Modelo II (Fronteira Estocástica com <i>dummy</i>)	Eficiência técnica	0,793	0,772	0,780	0,789	0,836	0,795
	Eficiência ambiental	0,675	0,696	0,658	0,672	0,709	0,681
Modelo III (Metafronteira Estocástica)	Eficiência técnica Intragrupos	0,795	0,795	0,783	0,799	0,870	0,749
	Eficiência ambiental Intragrupos	0,657	0,713	0,625	0,662	0,799	0,575
	Taxa de metatecnologia (MTR)	0,933	0,900	0,936	0,891	0,951	0,967
	Metaeficiência técnica	0,742	0,715	0,734	0,713	0,828	0,724
	Metaeficiência ambiental	0,641	0,652	0,607	0,625	0,808	0,581
Modelo	Indicador	Cobb-Douglas					
		Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
Modelo I (Fronteira Estocástica Simples)	Eficiência técnica	0,793	0,772	0,789	0,751	0,859	0,793
Modelo II (Fronteira Estocástica com <i>dummy</i>)	Eficiência técnica	0,799	0,788	0,787	0,794	0,833	0,804
Modelo III (Metafronteira Estocástica)	Eficiência técnica Intragrupos	0,803	0,791	0,781	0,807	0,869	0,792
	Taxa de metatecnologia (MTR)	0,926	0,912	0,936	0,880	0,953	0,931
	Metaeficiência técnica	0,744	0,722	0,731	0,711	0,829	0,737

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações econométricas apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7.

⁴¹ Reinhard, Lovell e Thijssen (1999) destacam que não é garantido que os escores de eficiência obtidos da equação (15) sejam não negativos. Na presente pesquisa não foram considerados os escores de eficiência ambiental de 220 propriedades (4,6% do total).

Observa-se pelos valores colocados na Tabela 8 que os modelos estimados não informam o mesmo valor de escore médio para as eficiências técnica e ambiental. Por exemplo, com os produtores agrupados a nível nacional, o Modelo I indica que a ET foi 0,789 usando a forma funcional Translog, o Modelo II indica a ET de 0,793, e o Modelo III indica metaeficiência técnica de 0,742. Essas diferenças também ocorrem quando se usa a forma funcional Cobb-Douglas, pela qual o Modelo I indica ET de 0,793, o Modelo II de 0,799 e o Modelo III indica a metaeficiência técnica de 0,744. Esses resultados, nos informam que, independentemente da forma funcional, a metaeficiência (que só pode ser calculada no Modelo III) é menor que a eficiência técnica calculada nos Modelo I e II.

Os trabalhos sobre o Brasil, resumidos no Quadro 2 do capítulo 2, apontam predominância de produtores de leite ineficientes no Brasil, sendo que apenas três trabalhos encontraram resultados que indicam os produtores de leite, nas amostras analisadas, serem eficientes tecnicamente, sendo eles: Silva e Bragagnolo (2018), Campos et al. (2018), Travassos et al. (2016) e Brito (2016). Os escores de eficiência técnica e ambiental apresentados na Tabela 8 (que no mínimo são de 0,742 e de 0,641, respectivamente; e no máximo são de 0,803 e de 0,675, respectivamente) estão próximos da média dos relatados por: Silva e Bragagnolo (2018), que constataram eficiências técnica média de 0,89 e ambiental média de 0,73; Campos et al. (2018), que evidenciam que a eficiência técnica média foi de 0,68 e a eficiência ambiental média foi de 0,45; Brito (2016), que encontrou a eficiência técnica média de 0,88. Travassos et al. (2016) apontam que 67% dos produtores analisados apresentam eficiência técnica superior a 0,60.

As pesquisas internacionais concluem, na sua maioria, que as fazendas leiteiras são eficientes tecnicamente, mas elas deixam a desejar quando relacionadas à eficiência ambiental. Para Reinhard, Lovell e Thijssen (1999), a eficiência técnica média foi alta (de 0,89), mas a eficiência ambiental média foi baixa (de 0,44). Dayananda (2016) obteve como resultado eficiência técnica média de 0,82 e eficiência ambiental média de 0,30. Alem et al. (2019) encontram eficiência técnica média de 0,90 e metaeficiência média de 0,88. Jiang e Sharp (2015) relataram que a metaeficiência técnica média foi de 0,69 e 0,82, respectivamente, para fazendas leiteiras das Ilhas Norte e Sul da Nova Zelândia. Na Irlanda, o estudo conduzido por Cele, Hennessy e Thorne (2023) identificou que as metaeficiências médias dos produtores de leite variam de 0,80 a 0,83. Os escores de eficiência técnica obtidos na presente pesquisa (apresentados na Tabela 8) estão próximos da média dos relatados pelas pesquisas internacionais. Mas com relação a eficiência ambiental, os resultados obtidos na tese apontam para maiores níveis de eficiência ambiental na amostra analisada no Brasil.

No entanto, independente dos seis modelos de fronteira estocástica utilizados para estimar os escores das eficiências e metaeficiências técnica e ambiental apresentados na Tabela 8, observa-se que as eficiências e metaeficiências médias para cada região são diferentes da média nacional. Por exemplo, os escores médios das eficiências técnicas das macrorregiões brasileiras no Modelo I com uso da forma funcional Cobb-Douglas tiveram a média no Brasil de 0,793, mas com valor máximo na região Sul de 0,859 e o valor mínimo de 0,751 no Sudeste. Mas esta ordem de classificação das regiões pode mudar caso modelos diferentes sejam utilizados, por exemplo, usando o Modelo II, ainda com a forma funcional Cobb-Douglas, o Sul continua sendo a região com maior eficiência técnica 0,833, mas o Sudeste passa para a terceira colocação com eficiência técnica de 0,794, ultrapassando Norte e Nordeste.

O acima relatado nos leva a questionar se modelos diferentes, mas usando a mesma forma funcional, apresentam diferenças estatísticas para as médias de eficiência técnica e ambiental que foram calculadas.

Por meio do teste *t* de *Student* (ver Tabela 9) rejeita-se a hipótese nula de que são iguais as médias das eficiências e das metaeficiências técnicas dos produtores agrupados a nível nacional quando se utilizam diferentes modelos de fronteira estocástica (Modelo I *versus* Modelo II, Modelo I *versus* Modelo III, Modelo II *versus* Modelo III) e utilizando a mesma forma funcional (Cobb-Douglas ou Translog). Em outras palavras, há diferenças estatísticas entre as médias dos escores de eficiência e da metaeficiência técnica estimados para os pequenos produtores de leite a partir de diferentes modelos adotados na presente pesquisa para estimar a fronteira de produção.

Tabela 9 - Resultados do teste *t* de *Student* para as diferenças entre as estimativas de eficiência e metaeficiência técnica obtidas através de três abordagens de fronteira estocástica

Objetivo	Hipótese testada	Teste <i>t</i> de <i>Student</i>	Probabilidade bilateral Pr (T > t)	Resultado
Verificar se há diferença nas eficiências técnicas estimadas via Modelo I, Modelo II e Modelo III – usando apenas a forma funcional da Translog	H ₀ : ET Modelo I = ET Modelo II H ₁ : ET Modelo I ≠ ET Modelo II	t = -9,5401	Pr = 0,0000	Rejeita H ₀
	H ₀ : ET Modelo I = MET Modelo III H ₁ : ET Modelo I ≠ MET Modelo III	t = 18,2296	Pr = 0,0000	Rejeita H ₀
	H ₀ : ET Modelo II = MET Modelo III H ₁ : ET Modelo II ≠ MET Modelo III	t = 19,6178	Pr = 0,0000	Rejeita H ₀
Verificar se há diferença nas eficiências técnicas estimadas via Modelo I, Modelo II e Modelo III – usando apenas a forma funcional da Cobb-Douglas	H ₀ : ET Modelo I = ET Modelo II H ₁ : ET Modelo I ≠ ET Modelo II	t = -15,0328	Pr = 0,0000	Rejeita H ₀
	H ₀ : ET Modelo I = MET Modelo III H ₁ : ET Modelo I ≠ MET Modelo III	t = 22,1584	Pr = 0,0000	Rejeita H ₀
	H ₀ : ET Modelo II = MET Modelo III H ₁ : ET Modelo II ≠ MET Modelo III	t = 24,6880	Pr = 0,0000	Rejeita H ₀

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimativas do teste *t*.

Nota: Nos Modelos I e II considera-se os escores de eficiência técnica e no Modelo III considera-se os escores de metaeficiência técnica.

No entanto, quando a mesma fronteira de produção (por exemplo, Modelo I) é estimada com forma funcional Cobb-Douglas ou com a Translog geram-se eficiências técnicas com pequenas diferenças nas suas magnitudes (de 0,789 e de 0,793, respectivamente para todo o Brasil). O mesmo ocorre para o Modelo II quando estimado com forma funcional Cobb-Douglas ou com a Translog. E similar ocorre para o Modelo III quando estimado usando a forma funcional Cobb-Douglas ou Translog. Isso é provado através teste *t*, mostrado na Tabela (10). Por exemplo, o teste *t* da diferença entre as metaeficiências técnicas calculadas usando o Modelo III com Cobb-Douglas e o Modelo III com Translog foi de -0,5120, com valor *p-value*=0,6086, rejeitando a hipótese de serem estatisticamente diferentes. Tal constatação também foi identificada por Cele, Hennessy e Thorne (2023) e Jiang e Sharp (2015).

Tabela 10 - Resultados do teste *t* de *Student* para as estimativas de eficiência e metaeficiência técnica obtida usando alternativamente as formas funcionais Cobb-Douglas e Translog, mas empregando o mesmo modelo de fronteira estocástica

Objetivo	Hipótese testada	Teste <i>t</i> de <i>Student</i>	Probabilidade bilateral Pr (T > t)	Resultado
Verificar se há diferença nas eficiências técnicas estimadas pela forma funcional Translog <i>versus</i> a Cobb-Douglas	H ₀ : ET Modelo I Translog = ET Modelo I Cobb-Douglas H ₀ : ET Modelo I Translog ≠ ET Modelo I Cobb-Douglas	t = -1,5301	Pr = 0,1261	Não rejeita H ₀
	H ₀ : ET Modelo II Translog = ET Modelo II Cobb-Douglas H ₀ : ET Modelo II Translog ≠ ET Modelo II Cobb-Douglas	t = -2,3843	Pr = 0,0172	Não rejeita H ₀
	H ₀ : MET Modelo III Translog = MET Modelo III Cobb-Douglas H ₀ : MET Modelo III Translog ≠ MET Modelo III Cobb-Douglas	t = -0,5120	Pr = 0,6086	Não rejeita H ₀

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimativas do teste *t*.

Nota: Nos Modelos I e II considera-se os escores de eficiência técnica e no Modelo III considera-se os escores de metaeficiência técnica.

A partir das estimativas dos modelos (Tabelas 5, 6 e 7), das eficiências estimadas (Tabela 8) e da literatura estudada⁴², pode-se inferir que a estimação da fronteira estocástica simples é recomendada apenas para uma amostra que compartilhe a mesma tecnologia de produção. A fronteira estocástica com a inclusão de *dummies* pode ser considerada uma melhoria, pois com variáveis *dummies* foi possível verificar que a produção de leite difere entre as cinco regiões brasileiras, principalmente ao comparar com a região Sul (grupo de controle). Na abordagem de metafronteira obtém-se os escores de metaeficiência técnica comparáveis entre os pequenos produtores de leite que operam sob diferentes níveis de tecnologia entre as regiões – apresentam heterogeneidade (ALEM et al., 2019; BATTESE; RAO; O'DONNELL, 2004).

Todos os modelos estimados na tese apresentam vantagens e desvantagens, no entanto a metafronteira é a mais apropriada para estudos que assumem a existência de diferenças tecnológicas entre os produtores, como é o caso das propriedades leiteiras analisadas nesta tese e que foram agrupadas por macrorregiões do país. Para Alem et al. (2019) e Kumbhakar, Wang e Horncastle (2015), ao considerar na estimação as diferenças tecnológicas presentes na amostra (por grupos de produtores), as chances de se obter resultados viesados/enganosos são reduzidas. Diante disso, as próximas análises são realizadas considerando os escores de metaeficiências técnica e ambiental para os produtores de leite, ou seja, escores obtidos usando o Modelo III.

Lembrando que para calcular a metaeficiência técnica e a ambiental – apresentadas nas equações (18) e (19) – é necessário, preliminarmente, obter a taxa de metatecnologia (MTR).

⁴² Detalhada no Capítulo 2.

Quando a MTR for 1 (100%) isto indica que a fronteira do grupo coincide com a metafronteira, ou seja, os pecuaristas de uma região estão operando com a máxima tecnologia disponível.

Observa-se na Tabela 8 que a MTR apresenta valor médio mais elevado na região Sul quando se utiliza a forma funcional Cobb-Douglas ou a Translog (valores de 0,953 e 0,951, respectivamente). Para a região Centro-Oeste, usando a forma funcional Translog, a MTR foi de 0,967. Isso indica que os pequenos produtores de leite dessas regiões estão mais próximos da metafronteira, e operando com nível tecnológico elevado (de 0,931 na forma funcional Cobb-Douglas). Por outro lado, a menor taxa média de metatecnologia é encontrada na região Sudeste, estando as suas propriedades mais distantes da metafronteira e com menor nível tecnológico. A região Sudeste, representada principalmente por produtores de leite de Minas Gerais, apresenta o maior rebanho bovino leiteiro do Brasil e a maior produção de leite, mas baixa produtividade. Minas Gerais é um dos estados com grande heterogeneidade entre os seus produtores de leite, sendo que a produção mais tecnicada neste estado é concentrada apenas na região do Triângulo Mineiro e do Alto Paranaíba (IBGE, 2017; NASCIMENTO et al., 2012; SILVA; BRAGAGNOLO, 2018).

Para Battese e Rao (2002), o *gap* tecnológico (o MTR) é um importante indicador a ser utilizado pelos gestores e formuladores de políticas, pois ele mede o impacto de melhorias realizadas no ambiente de produção global. Agentes públicos e privados podem alterar o ambiente por meio de investimentos em capital humano, físico e financeiro e auxiliar na transferência de conhecimento e tecnologias entre as regiões. Dessa forma, é possível acompanhar o impacto que os gastos direcionados em assistência técnica e gerencial (ATeG) podem gerar na redução da ineficiência dos produtores de leite e das diferenças tecnológicas existentes entre as regiões.

Analisando a metaeficiência técnica (MET) obtida através do modelo Translog da metafronteira estocástica (Tabela 8), os produtores situados nas regiões Sul, Nordeste, Centro-Oeste, Norte e Sudeste apresentaram os maiores escores médios de metaeficiência técnica, nesta ordem. Mas usando o modelo Cobb-Douglas da metafronteira estocástica, os pequenos produtores situados nas regiões Sul, Centro-Oeste, Nordeste, Norte e Sudeste apresentaram os maiores escores médios de metaeficiência técnica, nesta ordem (Tabela 8). Os produtores do Sul sempre são os que têm maior MET, independente da forma funcional utilizada (Cobb-Douglas ou Translog) para calcular a metaeficiência técnica.

A partir das estimativas do Modelo III foi identificado que os produtores de leite assistidos pela ATeG de diferentes regiões brasileiras apresentam diferenças na adoção de tecnologias, sendo apropriado o uso dos resultados da metafronteira estocástica para comparar

os níveis de metaeficiência técnica e ambiental (como destacado neste tópico). O teste *t* de *Student* apontou que não há diferenças estatísticas nos escores das metaeficiências técnica obtidas do modelo de metafronteira estocástica usando Cobb-Douglas ou usando Translog, então, analisam-se, no próximo item (5.3), as diferenças regionais das metaeficiências utilizando ambas as formas funcionais.

5.3 Diferenças regionais nas metaeficiências técnica e ambiental

Por meio do Modelo III e da forma funcional Translog e Cobb-Douglas, para cada pequeno produtor de leite assistido pela ATeG, busca-se analisar como os escores das metaeficiências técnica e ambiental se comportam a nível nacional e nas diferentes regiões brasileiras. A metaeficiência técnica – quando agrupados os produtores em nível de Brasil, e obtida usando a forma funcional Translog – é de 74,2%, o que indica que a quantidade de leite produzida pode ser aproximadamente 25,8% maior, caso os produtores operassem em plena eficiência. E, o valor médio da metaeficiência ambiental foi de 64,1%.

Considerando as 4.764 propriedades analisadas (que são pequenos produtores), a elevação da metaeficiência técnica para 100% corresponde a um aumento na produção anual de 74 milhões de litros de leite, saindo de 287 milhões de litros para 362 milhões de litros (alta de 26%). Extrapolando o resultado para os dados do Censo Agropecuário 2017, mas considerando propriedades leiteiras de até 50 hectares, a quantidade produzida teria aumento de quase 4,0 bilhões de litros, passando de 15,7 bilhões de litros para 19,8 bilhões de litros. Esse resultado aponta que há potencial para os pequenos produtores brasileiros aumentarem o volume produzido de leite sem precisar aumentar os seus custos, mas apenas realizando ajustes em sua produção para torná-la mais eficiente. A Assistência Técnica e Gerencial (ATeG), como apontado na estimativa do modelo metafronteira, pode ser um dos instrumentos que reduz o *gap* tecnológico entre os produtores e eleva a eficiência técnica, por meio da transferência de conhecimento, melhorias na gestão e da adoção de tecnologias.

O resultado obtido na presente pesquisa corrobora com as projeções do relatório “Projeções do Agronegócio 2020/2021 a 2030/2031”, elaborado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária. Nele consta que a produção de leite irá crescer entre 1,9% e 3,1% nos próximos 10 anos, podendo chegar em 2031 com produção de aproximadamente 43,9 bilhões de litros. A projeção é baseada principalmente em melhorias na gestão das fazendas e maior produtividade, gerados pela maior eficiência técnica das propriedades (MAPA, 2021).

A distribuição dos índices de metaeficiência técnica e ambiental, independente da forma funcional utilizada e da região considerada, pode ser definida como assimétrica à esquerda (ver

Figura 6). A região com maior nível de metaeficiência na produção leiteira, conduzida por pequenos produtores, é a Sul, podendo servir de exemplo para replicar conhecimento e tecnologias, por meio de programas público-privado que elevem os níveis de produção e sua eficiência. As regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste merecem atenção das instituições do setor leiteiro, pois estão entre as regiões que apresentaram os menores escores de metaeficiência técnica e ambiental.

Quando estimadas as metaeficiências com Cobb-Douglas e Translog (Figura 6), percebe-se que nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste uma parcela majoritária das propriedades apresenta metaeficiência técnica entre 70% e 90%. Na região Sudeste percebe-se que grande parte das propriedades se encontram na faixa de 60% a 80% de metaeficiência técnica. Por fim, a região Sul se destaca por apresentar grande concentração de propriedades entre 80% e 90% de metaeficiência técnica.

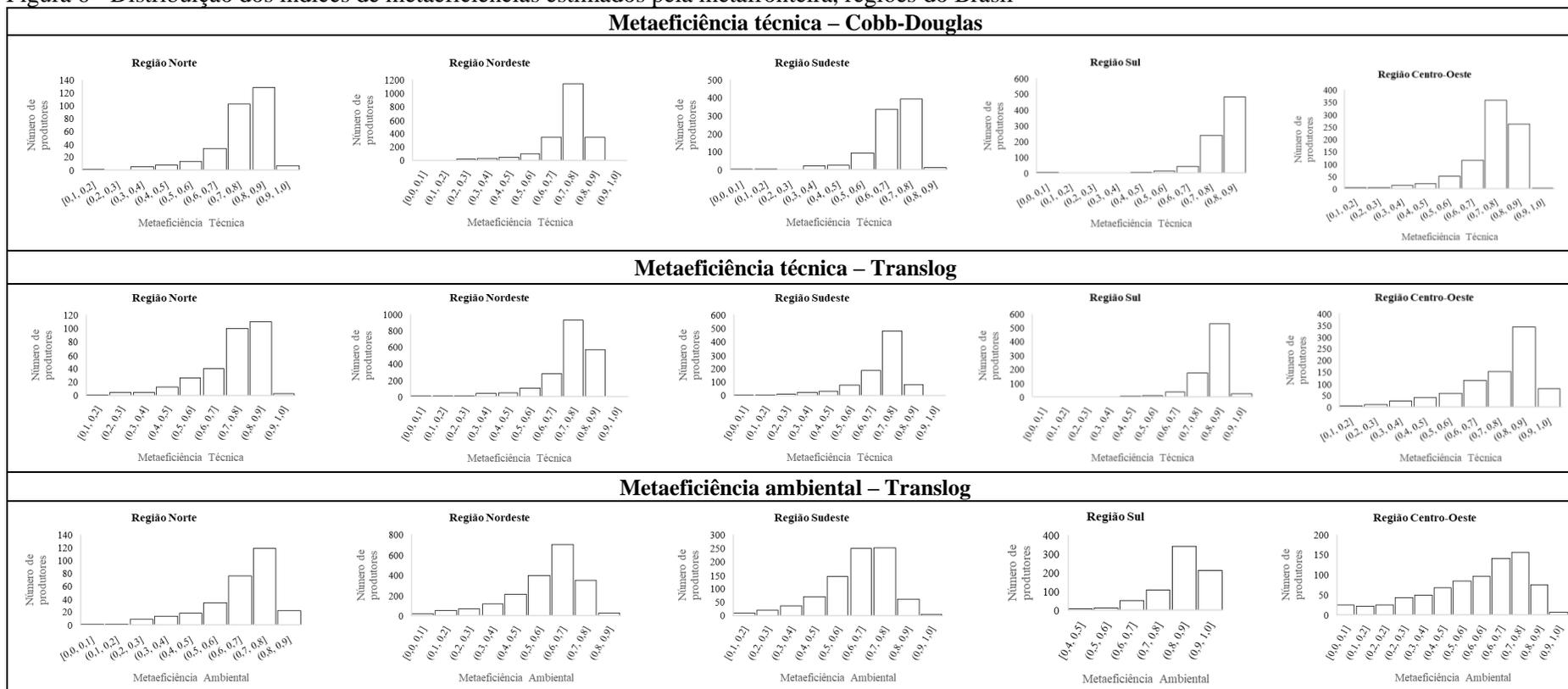
As estimativas de metaeficiência técnica e ambiental, obtidas de forma separada, indicam que os pequenos produtores de leite analisados e que fazem parte da região Sul estão mais próximos da fronteira do grupo, utilizando quase todo o seu potencial (ver taxa de metatecnologia na Tabela 8), e apresentam menor dispersão nos níveis de metaeficiência técnica e ambiental do que os produtores das demais regiões (ver Figura 6). Berndt et al. (2015) apontam em seu trabalho que a região Sul apresenta os maiores níveis de produtividade, pois o seu rebanho leiteiro apresenta raças geneticamente melhoradas. As informações do Censo Agropecuário de 2017 indicam que a região Sul concentrava 40% dos estabelecimentos agropecuários que receberam alguma orientação técnica em 2017, a qual permite maior acesso a conhecimento e tecnologias que proporcionam ganhos de produtividade (IBGE, 2017). Essas informações corroboram com os resultados da metaeficiência ambiental obtidas a partir do Modelo III e apresentados na Tabela 8 e na Figura 6, que mostram que, para a região Sul, sua média foi de 80,8% e há concentração entre as faixas de 80% e 90%. Além disso, destaca-se que a região Sul concentra as principais bacias leiteiras do Brasil (IBGE, 2017), com produtividades elevadas – acima da média internacional (por exemplo, da alcançada em países como Uruguai e Argentina) – sendo elas: mesorregião Centro Oriental Paranaense (6.247 litros/vaca/ano); mesorregião Noroeste Rio-Grandense (4.487 litros/vaca/ano); e, mesorregião Oeste Catarinense (4.415 litros/vaca/ano).

Na região Centro-Oeste, os escores de metaeficiência técnica concentram-se na faixa entre 70% e 90% (ver Figura 6). Esta região tem apresentado destaque nos últimos anos, resultado das adaptações tecnológicas para a produção no cerrado, dos produtores estarem na fronteira de expansão do agronegócio e por realizarem investimentos em máquinas e

equipamentos (HOTT; ANDRADE; JUNIOR, 2022). Dentre os estados que compõem o Centro-Oeste, Goiás apresenta elevada produção de leite e duas de suas mesorregiões são destaques nacionais: Sul e Centro Goiano. No entanto, o gráfico de frequência da metaeficiência ambiental no Centro-Oeste apresentou maior dispersão e menor escore médio da MEA (de 0,581 – ver Tabela 8) indicando a presença de muitos produtores ineficientes ambientalmente. Esse resultado pode estar atrelado ao fato de os produtores de leite da região Centro-Oeste em 2021, analisados na presente pesquisa, apresentarem produtividade média de leite de 3.192 kg/vaca/ano, 49% menor que a produtividade média dos produtores da região Sul – ver Tabela 4. A menor produtividade impacta em maiores níveis de emissão de gás metano pela pecuária bovina leiteira, o que pode ser alterado pela recuperação das pastagens degradadas (o que permitirá prover alimentação de qualidade ao rebanho) e acesso a tecnologias mais apropriadas para cada produtor (ANDRADE et al., 2021; HOTT; ANDRADE; JUNIOR, 2022; IBGE, 2017).

Os pequenos produtores da região Norte apresentaram escores médios de metaeficiências técnica e ambiental próximos da média nacional (ver Tabela 8). O incremento na produção leiteira nos estados do Pará e de Rondônia esteve atrelado principalmente aos preços de terra mais baixos, à abertura de portos e rotas de escoação da produção e ao melhoramento genético animal. Segundo Ferrazza e Castellani (2021), o acesso à mão de obra qualificada, ao crédito rural e à assistência técnica podem exercer papel importante na expansão da produção em regiões menos tradicionais na pecuária leiteira, como a região Norte.

Figura 6 - Distribuição dos índices de metaeficiências estimados pela metafronteira, regiões do Brasil



Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações econométricas do Modelo III.

Parte da produção nordestina de leite tem incorporado tecnologias e realizado melhoramento genético, que tem proporcionado ganhos na produção. Resultado disso pode ser percebido nas metaeficiências técnica e ambiental elevadas de alguns pequenos produtores, que se concentram na faixa entre 70% e 90%. Além disso, os pequenos produtores de leite no Nordeste têm buscado melhorar os seus processos produtivos e a gestão das suas propriedades, pois eles estão inseridos em um importante mercado consumidor e têm recebido a atenção de muitos programas governamentais de incentivo à produção, como o Projeto Agronordeste, que leva assistência técnica e gerencial a esses produtores (EMBRAPA, 2023).

Ao se observar a Tabela 8 e a Figura 6, identifica-se que a região Sudeste está entre as regiões do Brasil com menores médias de metaeficiências técnica e ambiental⁴³. Levando em consideração que a quantidade de animais é um dos principais fatores que influenciam o aumento ou a diminuição das emissões de CH₄, o estado de Minas Gerais tem a menor metaeficiência ambiental da região Sudeste. De acordo com Censo Agropecuário 2017 (IBGE, 2017), os produtores de leite de Minas Gerais com até 50 hectares de área total apresentaram a maior produção estadual de leite do Brasil (com 3.291.686 litros), o maior efetivo de vacas ordenhadas (1.243.528 cabeças), mas não apresentaram elevada produtividade, tendo essa sido de 2.647 litros/vaca/ano em 2017; diferença de 1.404 litros/vaca/ano quando comparada com a produtividade média dos produtores de leite com até área total de até 50 hectares do Rio Grande do Sul (4.051 litros/vaca/ano).

5.4 Metaeficiência ambiental e seus determinantes

Buscando verificar a associação entre a metaeficiência ambiental, a metaeficiência técnica e a produção de leite, foi realizado o teste de correlação de Spearman, a análise de correspondência múltipla e a regressão múltipla. Para tanto, foram considerados os escores das metaeficiências ambiental e técnica obtidas do modelo metafronteira estocástica (Modelo III) com forma funcional Translog, pois ela satisfaz a propriedade de interação da variável ambiental com as demais variáveis da função de produção, e, também, não apresenta diferenças estatísticas nas estimativas da metaeficiência técnica em comparação com a forma funcional Cobb-Douglas (ver teste *t* de *Student*, Tabela 10).

Após comprovada a associação estatística entre essas três variáveis (que é o segundo objetivo específico desta tese), serão estimada a regressão múltipla com dados de cada produtor, agrupados a níveis nacional e a regional, e assumindo a ordem causal sugerida, entre outros,

⁴³ Na presente pesquisa não são considerados os produtores de leite de São Paulo, devido a não participação da regional do Senar São Paulo no Programa ATeG em 2021.

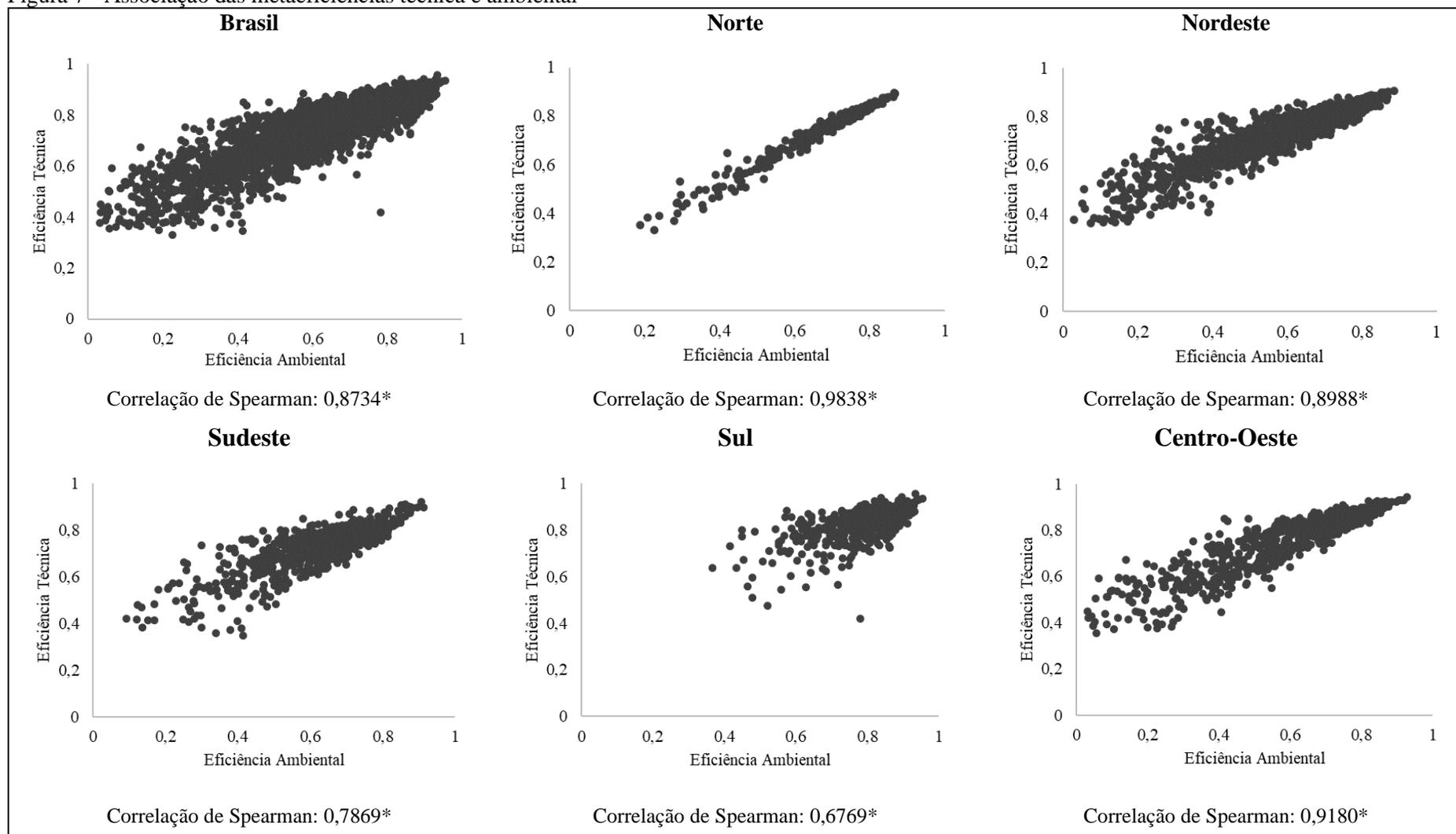
pelo Banco Mundial e pela FAO, ou seja, a metaeficiência ambiental é determinada pela metaeficiência técnica e pela escala de produção de leite (que é o terceiro objetivo específico desta tese).

Na Figura 7 tem-se os gráficos de associação entre as metaeficiências técnica e ambiental e o teste de correlação de Spearman para cada produtor de leite e os agrupando em nível de Brasil ou os agrupando para cada macrorregião do país. Os testes de correlação de Spearman para os pequenos produtores de leite, a nível nacional ou regional, indicaram que há correlação positiva entre as metaeficiências ambiental e técnica. A correlação de Spearman a nível nacional foi de 0,8734, e é estatisticamente significativa a nível de 1%.

A região Norte destaca-se por apresentar a maior correlação de Spearman entre as metaeficiências técnica e ambiental alcançadas por pequenos produtores de leite, sendo o coeficiente de 0,9838 e estatisticamente significativo a 1%. Por outro lado, a região Sul apresentou a menor correlação de Spearman, coeficiente de 0,6769, mas que também é estatisticamente significativa a 1%. As demais regiões apresentam coeficiente de correlação de Spearman variando entre 0,78 e 0,91.

Ao se observar os gráficos de associação das metaeficiências técnica e ambiental dos pequenos produtores de leite segundo as suas regiões de localização, percebe-se que os produtores da região Sul apresentam maiores níveis de metaeficiência técnica e ambiental, mas a cauda esquerda do gráfico de associação dessas metaeficiências tem elevada dispersão. De outro lado, a região Norte apresenta um grau de associação entre as metaeficiências técnica e ambiental forte e de formato quase linear (Figura 7).

Figura 7 - Associação das metaeficiências técnica e ambiental

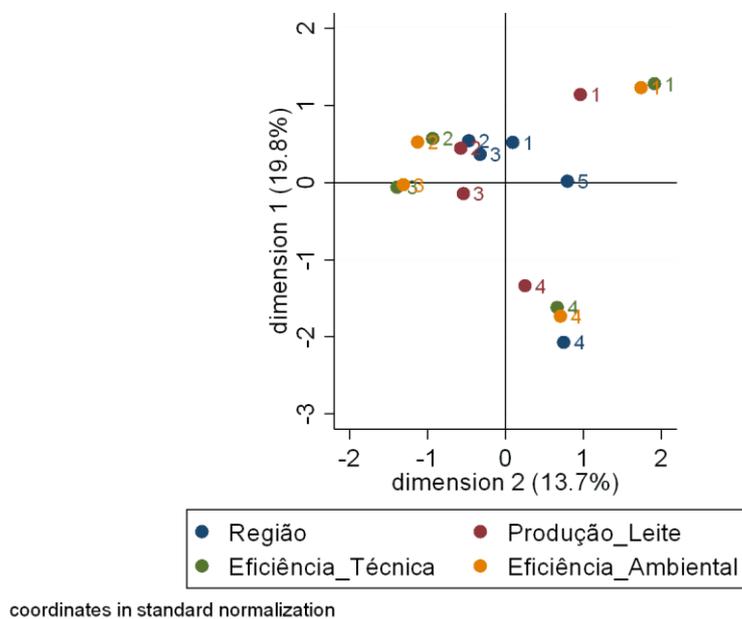


Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimativas do teste de correlação Spearman.

Nota: * indica que o coeficiente é estatisticamente significante ao nível de 1%

Para identificar as associações entre as variáveis metaeficiência ambiental, metaeficiência técnica, produção de leite e a região em que o produtor está inserido, realizou-se a análise de correspondência múltipla (ACM). Com base nos testes de Qui-Quadrado, ao nível de significância de 1%, verifica-se a existência de associação entre as variáveis, indicando que elas podem ser incluídas na análise de correspondência. Os resultados dos testes são apresentados nas Tabelas A5 e A6 no Apêndice. Dada a constatação de associação entre as variáveis, é construído o mapa perceptual, apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Mapa perceptual para metaeficiência ambiental, metaeficiência técnica, produção de leite e regiões



Fonte: Elaborada pela autora, a partir das ferramentas estatísticas.

Nota: Considera-se para a variável Região as seguintes categorias: 1 = Norte; 2 = Nordeste; 3 = Sudeste; 4 = Sul; 5 = Centro-Oeste. Para as variáveis Eficiência Técnica, Eficiência Ambiental e Produção de leite as categorias são definidas conforme o quartil: 1 = produtores rurais que apresentam os 25% menores valores; 2 = produtores rurais que apresentam os 50% dos menores valores (mediana); 3 = produtores rurais que apresentam os 75% dos menores valores; 4 = produtores rurais que apresentam os 25% maiores valores.

Com base no mapa perceptual (Figura 8), construído considerando as dimensões 1 e 2 – as quais apresentam os maiores percentuais de inércias principais (ver Tabela A6 do Apêndice), verifica-se que os produtores de leite classificados no quartil 1⁴⁴, com produção de leite, metaeficiências técnica e ambiental baixas apresentam forte associação com a região Norte (identificada com o número 1) e Centro-Oeste (identificada com o número 5). Os

⁴⁴ O primeiro quartil refere-se ao conjunto de produtores rurais que apresentam os 25% menores valores para as três variáveis consideradas (metaeficiências técnica e ambiental e produção de leite). E o quarto quartil separa os produtores de leite com valores de metaeficiências técnica e ambiental e produção de leite 25% maiores entre os valores analisados.

produtores de leite classificados nos quartis 2 e 3 da metaeficiência ambiental, metaeficiência técnica e produção de leite apresentam forte associação com a região Nordeste (identificada com o número 2) e Sudeste (identificada com o número 3). Por fim, produtores de leite classificados no quartil 4, com produção de leite, metaeficiências técnica e ambiental elevadas apresentam forte associação com a região Sul (identificada com o número 4).

Percebe-se que os pequenos produtores de leite da região Sul, por terem alcançado elevados níveis de produção, também apresentam índices de metaeficiência técnica e ambiental altos. Isso surge em função da adoção de tecnologias, acesso ao crédito rural e assistência técnica por parte desses produtores de leite. Alternativas para produtores de outras regiões se tornarem cada vez mais eficientes ambientalmente e elevar o nível de associação da metaeficiência técnica e ambiental são a adoção de suplementos alimentares, o melhoramento genético do rebanho e a implantação de sistemas de tratamento de dejetos (EMBRAPA, 2023).

A partir da constatação da correlação (teste de correlação Spearman) e das associações entre as variáveis (análise de correspondência), estimou-se a regressão múltipla para quantificar o impacto da metaeficiência técnica e da produção de leite sobre a metaeficiência ambiental dos produtores agrupados para todo o Brasil e por suas regiões (Tabela 11).

Para a melhor avaliação dos coeficientes da regressão, realizaram-se os testes de adequação da mesma, sendo que os resultados são apresentados na Tabela A7 no Apêndice. Os resultados dos testes indicam que as regressões estimadas apresentaram heterocedasticidade, sendo reestimadas e apresentadas na sequência as regressões robustas (rodadas com correção de *White*) para os produtores agrupados a nível nacional ou por suas regiões de localização. As regressões não apresentam multicolinearidade entre as variáveis e os resíduos seguem uma distribuição normal (ver os testes apresentados na Tabela A7 no Apêndice).

Na Tabela 11 tem-se as regressões múltiplas para explicar os determinantes da metaeficiência ambiental do Brasil e das suas regiões. De maneira geral, o coeficiente associado à variável metaeficiência técnica apresenta sinal positivo e é estatisticamente significativo ao nível de 1% para o Brasil e todas as suas regiões. Desta forma, conforme aumenta o nível de metaeficiência técnica das pequenas propriedades leiteiras, maiores são os seus níveis de metaeficiência ambiental. Esse resultado corrobora com a proposta feita pelos organismos internacionais (como *World Bank* e *FAO*, por exemplo) sobre a sinergia positiva existente entre a eficiência ambiental e técnica.

Tabela 11 - Determinantes da metaeficiência ambiental no Brasil e nas suas regiões – regressão múltipla

Regiões	Variáveis	Metaeficiência técnica	Produção de Leite	Norte	Nordeste	Sudeste	Centro-Oeste	Constante	R ²	Observações
Brasil	Coeficiente	1,377405*	-0,000000013 ^{NS}	0,0009769 ^{NS}	-0,0769733*	-0,0340546*	-0,0963409*	-0,3437392*	0,882	4.547
	Erro-Padrão	0,0148645	0,000000013	0,004323	0,0038784	0,0044688	0,0044985	0,0133343		
	Elasticidade	1,589834383	-0,000122065							
Norte	Coeficiente	1,183637*	0,000000045 ^{NS}					-0,2035515*	0,9685	291
	Erro-Padrão	0,017959	0,000000053					0,0135989		
	Elasticidade	1,294196954	0,001541334							
Nordeste	Coeficiente	1,49956*	0,000000024 ^{NS}					-0,5127562*	0,8362	1.921
	Erro-Padrão	0,0203646	0,000000026					0,015655		
	Elasticidade	1,810907358	0,001315149							
Sudeste	Coeficiente	1,244941*	-0,000000029 ^{NS}					-0,2793146*	0,6732	835
	Erro-Padrão	0,0400368	0,00000002					0,0296792		
	Elasticidade	1,420043435	-0,003245128							
Sul	Coeficiente	0,9812798*	0,0000000255*					-0,0164272*	0,4537	730
	Erro-Padrão	0,0728042	0,000000013					0,0617404		
	Elasticidade	1,006026841	0,004443554							
Centro-Oeste	Coeficiente	1,437163*	0,000000105*					-0,4908228*	0,8289	770
	Erro-Padrão	0,0278615	0,000000033					0,0222374		
	Elasticidade	1,758347296	0,009455545							

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações econométricas.

Significância: Estatisticamente significativa nos intervalos de confiança de *99%, ** 95% e *** 90%, ^{NS} não significativo.

Nota: As regressões apresentaram heterocedasticidade, sendo reestimadas novas regressões com correção de *White*. Os testes realizados nas regressões são apresentados na Tabela A7 no Apêndice.

Os coeficientes associados às variáveis regionais (*dummies*), quando consideram os 4.547 produtores agrupados em nível de Brasil, apresentaram sinal negativo e são estatisticamente significantivos ao nível de 1%, exceto para região Norte. Esse resultado indica que os produtores situados nas demais regiões do Brasil, quando comparados com os situados na região Sul, apresentam em média menores níveis de metaeficiência ambiental.

A elasticidade⁴⁵ associada à metaeficiência técnica indica que o aumento de 1% na mesma causa elevação de 1,59% na metaeficiência ambiental quando os pequenos produtores de leite são tomados (agrupados) em nível de Brasil. Os pequenos produtores de leite da região Sul têm a menor elasticidade associada à metaeficiência técnica, sendo que o aumento de 1% na metaeficiência técnica desses pequenos produtores de leite causa a elevação de 1% na sua metaeficiência ambiental. Por outro lado, a região Nordeste apresenta a maior elasticidade associada à metaeficiência técnica, em que o aumento de 1% na metaeficiência técnica dos pequenos produtores de leite do Nordeste causa a elevação de 1,81% na sua metaeficiência ambiental (ver Tabela 11).

O coeficiente associado à variável produção de leite não foi estatisticamente significativo nas regressões, tomando os pequenos produtores agrupados em nível do Brasil, da região Norte, Nordeste e Sudeste, tornando esta variável pouco relevante para explicar as suas metaeficiências ambientais. Nas regiões Sul e Centro-Oeste, no entanto, o coeficiente associado à variável produção de leite apresentou sinal positivo e foi estatisticamente significativo, indicando que o aumento de 1% na produção de leite eleva em 0,004% a metaeficiência ambiental dos produtores de leite da região Sul e em 0,009% a metaeficiência ambiental dos produtores de leite da região Centro-Oeste (Tabela 11).

Le, Jeffrey e Na (2020) e Dayananda (2016) também analisam os determinantes da eficiência ambiental e destacam que o aumento na produção de leite está relacionado positivamente com a eficiência ambiental. Dayananda (2016) ressalta que quanto maior é a produção de leite, menor tende a ser as emissões de gases de efeito estufa por quilograma de leite produzido, elevando a eficiência ambiental das propriedades.

Para as regiões Sul e Centro-Oeste, as produções de leite dos seus pequenos produtores impactam positivamente nas suas metaeficiências ambientais. Os produtores localizados na região Sul se destacam pela maior produtividade (litros/vaca/ano), na adoção de modernas tecnologias e no emprego de rebanhos com raças geneticamente melhoradas. Na região Centro-

⁴⁵ Para melhor interpretação dos coeficientes, foi calculado o coeficiente de elasticidade dos modelos aplicando a equação $\beta \left(\frac{\bar{X}}{\bar{Y}} \right)$, em que β é coeficiente angular, \bar{X} é o valor médio da variável independente e \bar{Y} é o valor médio da variável dependente (GREENE, 2003).

Oeste concentram-se os produtores de leite que estão na fronteira de expansão agropecuária do Brasil e adotando, crescentemente, tecnologias modernas na produção, principalmente investindo na recuperação das pastagens e na produção de grãos – insumos para alimentação dos animais (HOTT, ANDRADE e JUNIOR, 2022).

Segundo Embrapa (2023) e Hott, Andrade e Junior (2022), a região Centro-Oeste tem grande potencial para recuperação das suas pastagens degradadas, as quais podem elevar a quantidade e a qualidade do leite produzido e proporcionar o sequestro de carbono. Também, o melhoramento genético do rebanho desta região pode contribuir para elevar a produtividade e reduzir as emissões de metano por litro de leite produzido.

A produção e a produtividade de leite em grande parte da região Norte do Brasil ainda são, de modo geral, baixas, seja por fatores logísticos que dificultam o escoamento do leite, seja pelas restrições à produção devido a questões ambientais de uso do solo, devido às pastagens degradadas, ou pela dificuldade de adaptação das raças leiteiras mais produtivas ao clima tropical. Não obstante, algumas partes da região Norte têm expandido a produção de leite por meio do aumento no rebanho leiteiro (em especial as de fronteiras agrícola em Rondônia e Pará), ainda que a produtividade e a qualidade do leite ainda estão aquém quando comparadas com demais regiões do Brasil (FERRAZZA; CASTELLANI, 2021; QUEIROZ; SOUZA, 2021).

A pecuária leiteira da região Sudeste destaca-se pelo contingente de vacas ordenhadas e pelo volume de sua produção. Contudo, os níveis de produtividade e de metaeficiência técnica e ambiental dos produtores desta região ainda deixam a desejar, devido às áreas de pecuária extensiva serem conduzidas, em boa parte, em pastagens degradadas (causadas pelo manejo inadequado e a alta taxa de lotação), pela sazonalidade da capacidade de suporte das pastagens (devido à presença de estação de seca), pelo rebanho com raças diversas e pela heterogeneidade dos sistemas de produção empregados. No entanto, a adoção de pastejo rotacionado e a correção do solo podem gerar incrementos na produtividade e reduzir os prejuízos econômicos e ambientais da pecuária leiteira nesta região (VILELA; ANDRADE, 2018). Ressalta-se que na presente pesquisa não são considerados os produtores de leite de São Paulo, devido a não participação da regional do Senar-SP no Programa ATeG em 2021.

A sinergia encontrada entre as metaeficiências técnica e ambiental também foi constatada nos testes de correlação de Spearman aplicados nas estimativas de Fronteira

Estocástica Simples (Brasil)⁴⁶ e com *dummies* (regiões)⁴⁷. A sinergia entre as metaeficiências técnicas e ambientais pode estar atrelada aos meios necessários para mitigar/reduzir as emissões de GEE, como alimentação apropriada para o rebanho, genética dos animais e manejo adequado (DAYANANDA, 2016; LE; JEFFREY; AN, 2020; REINHARD; LOVELL; THIJSEN, 1999; SILVA; BRAGAGNOLO, 2018).

O Anuário do Leite 2023, organizado pela Embrapa (2023), teve como pauta central o leite de baixo carbono. No Brasil, várias pesquisas estão sendo conduzidas para mensuração das emissões de metano pelo rebanho leiteiro, mas de forma geral a estratégia apontada é que a redução na pegada de carbono se dará pela melhoria da eficiência da produção. FAO (2023), Embrapa (2023), Dayananda (2016) e Silva e Bragagnolo (2018) destacam que quanto maior desempenho do rebanho e eficiência da produção, menor a intensidade de metano emitido, formando o tripé da pecuária leiteira do futuro: eficiência, lucratividade e sustentabilidade.

⁴⁶ O teste de correlação de Spearman, que apontou uma correlação positiva entre as duas eficiências de 0,93 que é significativa a 1% (não aceitando a hipótese que eficiência técnica e ambiental são independentes).

⁴⁷ O teste de correlação de Spearman, que apontou uma correlação positiva entre as duas eficiências de 0,92 que é significativa a 1% (não aceitando a hipótese que eficiência técnica e ambiental são independentes).

6. CONCLUSÃO

O setor pecuário sofreu muitas transformações, principalmente, a partir dos anos 1990, que fizeram a produção de leite aumentar no Brasil. Apesar da expressiva produção, estando o país entre os cinco países com maior produção de leite bovino, o Brasil apresenta, em média, baixa produtividade de sua pecuária. A menor produtividade média pode estar atrelada às especificidades regionais do país, à estrutura de produção e à baixa adoção de tecnologias modernas de produção por grande parte dos seus pecuaristas (sejam pequenos ou não). Diversas pesquisas analisaram a eficiência técnica dos produtores de leite, entretanto, muitos desconsideraram os resultados distintos gerados pelos modelos disponíveis para o cálculo desta eficiência, não consideraram a heterogeneidade regional presente na pecuária leiteira nacional, não analisaram as variáveis que podem influenciar na ineficiência – principalmente a assistência técnica, e, notadamente, não analisaram a eficiência ambiental.

O presente estudo buscou estimar as eficiências e metaeficiências técnica e ambiental das pequenas propriedades leiteiras nas diferentes regiões brasileiras e identificar seus determinantes. Para tanto, as estimativas foram realizadas utilizando os microdados do Programa de Assistência Técnica e Gerencial (ATeG) do SENAR, os quais apresentam as informações mais atualizadas – referentes ao ano de 2021 e disponíveis atualmente – sobre as condições sociais, econômicas e produtivas de uma amostra de produtores de leite de cada região do Brasil. Ressalta-se que o universo analisado apresenta predominância de produtores caracterizados como minifúndios e pequenos produtores, e não considera produtores de alguns estados brasileiros, como São Paulo e Paraná.

As fronteiras de produção e as eficiências para o setor leiteiro foram estimadas, nesta tese, usando três modelos de fronteira estocástica e duas formas funcionais (Cobb-Douglas e Translog), a fim de captar particularidades regionais e possíveis heterogeneidades. Procura-se explorar diferenças e similaridades de resultados obtidos dos modelos e das formas funcionais consideradas. Definiram-se e estimaram-se: Modelo I = uma única fronteira estocástica de produção para o Brasil, sem diferenciar as regiões e com vetor de variáveis explicativas da ineficiência; Modelo II = uma única fronteira estocástica de produção para o Brasil, mas com *dummies* para captar diferenças regionais e com vetor de variáveis explicativas da ineficiência; e, Modelo III = metafronteira estocástica obtida por meio de grupos de produtores de cada região do país, considerando o vetor de variáveis explicativas da ineficiência e do *gap* tecnológico entre os grupos de produtores de cada região. Atentando-se que os Modelos I e II calculam as eficiências técnica e ambiental e o Modelo III calcula, além dessas eficiências, as metaeficiências, que são menores que as eficiências citadas e que levam em consideração a

adoção de pacotes tecnológicos diferentes pelos produtores de leite segundo a região em que se situam.

Os resultados desta pesquisa indicam que os produtores de leite assistidos pela ATeG apresentam diferentes níveis de eficiências técnica e ambiental nas distintas regiões brasileiras. Em média, a eficiência técnica foi de 79% e a eficiência ambiental de 67% nos modelos de fronteira estocástica. Para o modelo de metafronteira estocástica, usando a forma funcional Translog, a média da metaeficiência técnica foi de 74,2% e da metaeficiência ambiental foi de 64,1%. Os dados sugerem que ainda é possível elevar a metaeficiência técnica em até 25,8%, gerando impacto no aumento da produção de leite no Brasil.

Quando analisadas as metaeficiências técnica e ambiental a nível regional, percebe-se que a região Sul apresenta os maiores escores do Brasil, independente da forma funcional adotada na estimação. Por outro lado, as regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste estão entre as regiões que apresentaram os menores escores de metaeficiência técnica e ambiental, variando conforme a forma funcional considerada (Cobb-Douglas ou Translog). A diferença na magnitude da metaeficiência técnica da região Sul em relação às demais regiões deve-se, principalmente, aos produtores sulinos investirem em suplementação alimentar (os gastos são 50% maiores do que na região Sudeste) e em segurança sanitária e fitossanitária (gastos com medicamentos). Por usarem rebanho bovino leiteiro com maior produtividade (da raça holandesa) e por receberem assistência técnica. A pecuária leiteira da região Sul pode ser considerada um modelo de condução da atividade para as outras regiões do Brasil, a fim de elevar os seus níveis de eficiência técnica e ambiental – sempre considerando as diferenças e adaptando-se às necessidades dos produtores de cada região.

Com relação às estimativas alternativas usando as formas funcionais Cobb-Douglas e Translog, adotadas no presente estudo, foi observado que não há grandes diferenças nos valores das eficiências e metaeficiências técnicas, quando se usa o mesmo modelo (ou seja, o mesmo tipo de fronteira estocástica). Para a maioria das regiões e para o Brasil, os escores obtidos por meio da Cobb-Douglas resultaram em níveis de eficiência e metaeficiência com maior magnitude. No entanto, usando o modelo Translog foi possível captar de maneira mais detalhada as relações entre os fatores de produção e calcular a eficiência e metaeficiência ambiental das propriedades leiteiras. O teste *t* de *Student* indica que não há diferença estatística nos escores médios das eficiências e metaeficiência técnica a nível nacional quando o mesmo modelo de fronteira estocástica é estimado seja com o uso da forma funcional Cobb-Douglas ou com o uso da Translog.

Porém, quando analisadas os escores médios da eficiência e da metaeficiência técnica a nível nacional obtidas usando diferentes modelos da fronteira estocástica e que são estimadas usando a mesma forma funcional – como, por exemplo, fronteira estocástica com e sem *dummies* regionais estimadas com a forma funcional Translog – o teste *t* de *Student* indica haver diferenças estatísticas entre os escores de eficiência e metaeficiência técnica.

Nos cálculos usando a metafronteira, a magnitude das metaeficiências técnica e ambiental dos produtores de leite é menor e sua distribuição é menos assimétrica à esquerda que a distribuição das eficiências técnica e ambiental obtidas via os modelos de fronteira estocástica com e sem *dummies* regionais, pois, segundo a metafronteira, os produtores não compartilham da mesma tecnologia de produção, havendo um *gap* tecnológico entre a fronteira do grupo e a metafronteira. Com isso, ao não considerar as diferenças regionais entre os produtores de leite (ou seja, ao se usar a fronteira estocástica simples) há uma superestimação da eficiência técnica e ambiental.

A partir dos diferentes resultados obtidos via os três modelos de fronteira estocástica estimados (seja usando a forma funcional Cobb-Douglas ou a Translog), foram selecionados os resultados da metafronteira estocástica com Translog para comparar os níveis de metaeficiência técnica e ambiental dos pequenos produtores de leite e avaliar as associações estatísticas entre as suas metaeficiências e a escala de produção. Assume-se que, o modelo de metafronteira estocástica é mais apropriado para retratar a realidade da pecuária bovina brasileira, em que os níveis tecnológicos dos pequenos produtores de leite são heterogêneos, variando, principalmente, entre as regiões brasileiras, e confirmando a pressuposição da presente tese. Ademais, a metafronteira estocástica calculada usando a forma funcional Translog permite calcular a metaeficiência ambiental para cada pequeno produtor de leite.

Foi constatado que o acesso à assistência técnica e gerencial reduz o *gap* tecnológico entre os produtores de leite, pois o coeficiente associado a esta variável apresenta sinal negativo (mas sendo apenas estatisticamente significativo no Modelo III com o uso da função Translog), indicando que quanto mais tempo os pequenos produtores de leite recebem a ATeG menor é a heterogeneidade tecnológica entre eles nas diferentes regiões brasileiras. A assistência técnica é um importante instrumento para viabilizar o setor leiteiro a adotar as boas práticas, obter ganhos de produtividade e elevar a produção de leite no Brasil, pois o produtor passa a ter acesso a informações sobre novas tecnologias, pesquisas e conhecimentos importantes para o aprimoramento de suas atividades.

Ressalta-se a importância de ampliar os convênios público-privados da assistência técnica, principalmente nas regiões Norte e Sudeste. Essas são as que apresentaram os menores

níveis de eficiência, segundo as estimativas realizadas nesta tese. Acredita-se que, por meio de investimentos público-privados em assistência técnica rural, será possível melhorar os níveis de eficiência técnica dos produtores de leite, contribuindo para melhor alocação dos insumos produtivos, melhor uso das tecnologias e elevação na produção de leite nacional.

As metaeficiências ambientais dos produtores, agrupados a nível nacional ou regional, apresentam relações positivas e estatisticamente significativas com as suas metaeficiências técnicas, sendo isto captado tanto pelo teste de correlação de Spearman e quanto pela análise de correspondência múltipla. Segundo os resultados das regressões múltiplas, têm-se que nas regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste o aumento de 1% na metaeficiência técnica causa elevação em mais de 1% na metaeficiência ambiental das suas pequenas propriedades leiteiras. Tal resultado é fundamental para comprovar a sinergia existente entre as metaeficiências ambiental e a técnica, apontada pelos organismos internacionais (como *World Bank* e FAO, por exemplo). O uso adequado da suplementação alimentar, a melhoria das pastagens, a adoção de boas práticas de manejo e de sanidade animal são fatores que auxiliam no aumento da produção de leite e na mitigação de emissão de gás metano pelo animal. Nesse ponto, a melhoria conjunta das metaeficiências técnica e ambiental da pecuária leiteira contribui no alcance da meta de redução das emissões de gases de efeito estufa provenientes do setor agropecuário, assumida pelo Brasil na 26^a Conferência das partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas, ocorrida em 2021.

Os resultados obtidos e a metodologia utilizada nesta pesquisa abrem espaço para que novos estudos sejam realizados e considerando anos mais recentes das propriedades que receberam assistência técnica (à medida que tais dados estejam disponíveis), bem como a utilizando de outras metodologias de mensuração das emissões – que considerem a alimentação e idade do rebanho e a compensação das emissões do rebanho pela pastagem. Além disso, foi identificado que as eficiências e metaeficiências dos produtores de leite são assimétricas à esquerda, sugerindo que futuros estudos possam avaliar os determinantes das eficiências e metaeficiências técnica e ambiental, mas utilizando a regressão quantílica e verificando se isto gera resultados diferentes ou não em relação aos apresentados na tese. Por fim, sugere-se que futuros estudos testem na regressão múltipla outras variáveis explicativas da eficiência ambiental (à medida que haja dados para calculá-las). Ademais, as fronteiras estocásticas poderiam ser estimadas agregando os produtores segundo os biomas brasileiros e, após isto, que se faça uma comparação dos resultados dessas novas estimativas com os apresentados nesta tese, em que os produtores foram agregados nas macrorregiões brasileiras.

A presente pesquisa apresenta algumas limitações no que tange: (a) à mensuração das emissões de metano, pois se utiliza a metodologia *Tier 1*, que é uma aproximação simplificada e que está sujeita a incertezas nas estimativas; (b) não considera produtores de leite de todos os estados brasileiros, não estando presente na amostra, por exemplo, produtores de São Paulo e do Paraná; e, (c) os dados utilizados têm predominância de pequenas propriedades leiteiras.

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos consideram informações mais próximas da atualidade (do ano de 2021) e apontam que há uma relação positiva entre metaeficiências técnica e ambiental, e que a assistência técnica e gerencial pode auxiliar na redução do *gap* tecnológico entre os produtores de diferentes regiões brasileiras.

REFERÊNCIAS

- ABDULAI, A. N.; ABDULAI, A. Examining the impact of conservation agriculture on environmental efficiency among maize farmers in Zambia. **Environment and Development Economics**, v. 22, n. 2, p. 177–201, 2017.
- ALBANEZ, J. R.; ALBANEZ, A. C. P. As Mudanças Climáticas e o Setor Agropecuário. Em: **Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia**. [s.l.] CRMV-MG, 2014. v. 74.
- ALEM, H. et al. Regional differences in technical efficiency and technological gap of Norwegian dairy farms: a stochastic meta-frontier model. **Applied Economics**, v. 51, n. 4, p. 409–421, 20 jan. 2019.
- ALMEIDA, M.; BACHA, C. J. C. Literatura sobre eficiência na produção leiteira brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 20–33, 2021.
- ANDRADE, R. G. et al. Concentração e distribuição do leite no Brasil. **Revista Política Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 21–28, 2021.
- BACHA, C. J. C. **Economia e política agrícola no Brasil**. Campinas, SP: Alínea, 2018.
- BATTESE, G. E.; COELLI, T. J. A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data. **Empirical Economics**, v. 20, p. 325-332, 1995.
- BATTESE, G. E.; RAO, D. S. P. Technology Gap, Efficiency, and a Stochastic Metafrontier Function International Journal of Business and Economics. **International Journal of Business and Economics**, v. 1, n. 2, p. 87-93, 2002.
- BATTESE, G. E.; RAO, D. S. P.; O'DONNELL, C. J. A metafrontier production function for estimation of technical efficiencies and technology gaps for firms operating under different technologies. **Journal of Productivity Analysis**, v. 21, n. 1, p. 91–103, 2004.
- BERNDT, A. et al. Emissões de metano por fermentação entérica e manejo de dejetos de animais: relatório de referência. **Embrapa**, p. 150, 2015.
- BRASIL. **Lei nº 12.188, de 11 de janeiro de 2010**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112188.htm>. Acesso em: 21 maio. 2023.
- BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Comex Stat**. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>>. Acesso em: 24 abr. 2023a.
- BRASIL. **Diário da União**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/servicos/diario-oficial-da-uniao>>. Acesso em: 21 mar. 2023b.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>>. Acesso em: 4 abr. 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

BRITO, R. A. DE. **Há espaços para melhora no setor leiteiro? Uma análise de fronteira estocástica de produção e regressão quantílica utilizando dados do Censo Agropecuário 2006 (IBGE)**. Piracicaba-SP, Universidade de São Paulo – ESALQ, 2016.

CAMPOS, S. A. C. et al. Determinantes da Eficiência Ambiental de Longo Prazo Para a Produção Láctea Mineira. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 16, n. 1, p. 117–145, 2018.

CARRER, M. J. et al. Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 177, p. 121510, 2022.

CEDERBERG, C.; MATTSSON, B. **Life cycle assessment of milk production - a comparison of conventional and organic farming**. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S095965269900311X?token=6C02FEAF0F99C1943007E5875FFC32F7C771866506FBC9AA80D8F711D4C10ACB5FDAEAA8F42CE3DD75149AD04389686E>>. Acesso em: 18 jan. 2021.

CELE, L. P.; HENNESSY, T.; THORNE, F. Regional technical efficiency rankings and their determinants in the Irish dairy industry: A stochastic meta-frontier analysis. **Agribusiness**, v. 39, n. 3, p. 727–743, 1 jul. 2023.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL - CNA. **Panorama do Agro**. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>>. Acesso em: 19 abr. 2023.

COELLI, T. JAMES. et al. **An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis**. New York: Springer-Verlag, 2005.

COELLI, T.; RAO, D. S. P.; BATTESE, G. E. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. [s.l.] Springer Science, 1998. v.1.

CUESTA, R. A. A Production Model With Firm-Specific Temporal Variation in Technical Inefficiency: With Application to Spanish Dairy Farms. **Journal of Productivity Analysis**, v. 13, p. 139–158, 2000.

DALCIN, D. et al. **A atividade leiteira no contexto da agricultura familiar: um estudo de caso**. Sober. Anais...Porto Alegre: 2009.

DAYANANDA, C. **Technical and Environmental Efficiencies of Ontario Dairy Farming Systems**. Guelph, University of Guelph, 2016.

DE SOUSA, L. O.; CAMPOS, S. A. C.; GOMES, M. F. M. Technical performance of milk producers in the state of Goiás, Brazil, in the short and long terms. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 8, p. 1944–1950, 2012.

DIESEL, V. et al. Política de Assistência Técnica e Extensão Rural no Brasil: um caso de desmantelamento? **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 29, n. 3, p. 597–634, 2021.

DOS SANTOS, J. A.; VIEIRA, W. DA C.; BAPTISTA, A. J. M. DOS S. Eficiência técnica em propriedades leiteiras da microrregião de Viçosa-MG: uma análise não-paramétrica. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 7, n. 2, p. 162–172, 2005.

DRIESSEN, P.; HILLEBRAND, B. Adoption and diffusion of green innovations. **Bartels, Gerard C.; Nelissen, Wil J.A. (ed.), Marketing for sustainability; towards transactional policy-making**, p. 343–355, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **ANUÁRIO Leite 2023: leite baixo carbono**. Juiz de Fora: 2023. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1154264/1/Anuario-Leite-2023.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2023.

FALCÃO SILVA, L.; MORELLO, T. Is there a trade-off between efficiency and cooperativism? Evidence from Brazilian worker cooperatives. **Journal of Co-operative Organization and Management**, v. 9, p. 2213–297, 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Shaping the future of livestock: sustainably, responsibly, efficiently**. Berlin: FAO, 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Methane emissions in livestock and rice systems**. Rome: FAO, 2023.

FARIA, V. P. DE. **PENSANDO O LEITE**. Rio de Janeiro: FAERJ e SEBRAE-RL, 2015. v. 1: conceitos.

FARRELL, M. J. The Measurement of Productive Efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 120, n. 3, p. 253–290, 1957.

FASSIO, L. H.; REIS, R. P.; GERALDO, L. G. Desempenho técnico e econômico da atividade leiteira em Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 6, p. 1154–1161, 2006.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. v. 1

FERRAZZA, R. DE A.; CASTELLANI, E. Analysis of Brazilian livestock transformations: a focus on dairy farming. **Ciência Animal Brasileira**, v. 22, 2021.

FERREIRA JUNIOR, S.; CUNHA, N. R. DA S. Eficiência técnica na atividade leiteira de Minas Gerais: um estudo a partir de três sistemas de produção. **Organizações Rurais e Agroindustriais/Rural and Agro-Industrial Organizations**, v. 6, n. 2, p. 46–60, 2004.

GALDEANO-GÓMEZ, E.; CÉSPEDES-LORENTE, J. Environmental spillover effects on firm productivity and efficiency: An analysis of agri-food business in Southeast Spain. **Ecological Economics**, v. 67, n. 1, p. 131–139, 2008.

- GONÇALVES, R. M. et al. Analysis of technical efficiency of milk-producing farms in Minas Gerais. **Economia Aplicada**, v. 12, n. 2, p. 321–335, 2008.
- GREENE, W. The econometric approach to efficiency analysis. Em: **The measurement of productive efficiency and productivity Growth**. New York: Oxford University Press, 2008.
- GREENE, W. H. **Econometric analysis**. 5. ed., Pearson Education, 2003.
- HAYAMI, Y. Sources of Agricultural Productivity Gap Among Selected Countries. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 51, n. 3, p. 564–575, 1969.
- HAYAMI, Y.; RUTTAN, V. W. Agricultural Productivity Differences among Countries. **The American Economic Review**, v. 60, n. 5, p. 895–911, 1970.
- HOGAN, K. B. **Options for reducing Methane Emissions Internationally**. Washington: 1993. Disponível em: <<https://www.epa.gov/>>. Acesso em: 4 fev. 2021.
- HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; JUNIOR, W. C. P. DE M. **Geotecnologias: aplicações na cadeia produtiva do leite**. Ponta Grossa - PR: Atena Editora, 2022.
- HUANG, C. J.; HUANG, T. H.; LIU, N. H. A new approach to estimating the metafrontier production function based on a stochastic frontier framework. **Journal of Productivity Analysis**, v. 42, n. 3, p. 241–254, 2014.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **SIDRA: Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. Acesso em: 5 fev. 2021.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. EMISSIONS FROM LIVESTOCK AND MANURE MANAGEMENT. Em: **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. IPCC, 2019. v. 4.
- JANK, M. S.; GALAN, V. B. **Competitividade do sistema agroindustrial do leite**. 1998.
- JIANG, N.; SHARP, B. Technical efficiency and technological gap of New Zealand dairy farms: a stochastic meta-frontier model. **Journal of Productivity Analysis**, v. 44, n. 1, p. 39–49, 27 ago. 2015.
- KODDE, D. A.; PALM, F. C. Wald Criteria for Jointly Testing Equality and Inequality Restrictions. **Econometrica**, v. 54, n. 5, p. 1243–1248, set. 1986.
- KUMBHAKAR, S. C.; LOVELL, C. A. K. **Stochastic Frontier Analysis**. 2000.
- KUMBHAKAR, S. C.; WANG, H.-J.; HORNCastle, A. **A PRACTITIONER'S GUIDE TO STOCHASTIC FRONTIER ANALYSIS USING STATA**. Cambridge University Press, 2015.
- LATRUFFE, L. et al. Identifying and assessing intensive and extensive technologies in European dairy farming. **European Review of Agricultural Economics**, v. 50, n. 4, p. 1482–1519, 2023.

LE, S.; JEFFREY, S.; AN, H. Greenhouse Gas Emissions and Technical Efficiency in Alberta Dairy Production: What Are the Trade-Offs? **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 52, n. 2, p. 177–193, 2020.

LEMOS, J. DE J. S. et al. Heterogeneidade espacial da produção de leite em Pernambuco. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 10, p. 17964–17986, 2023.

LIMA, M. A. DE. Agropecuária brasileira e as mudanças climáticas globais: caracterização do problema, oportunidades e desafios. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 19, n. 3, p. 451–472, 2002.

MAGALHÃES, K. A.; CAMPOS, R. T. Eficiência técnica e desempenho econômico de produtores de leite no Estado do Ceará, Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 44, n. 4, p. 695–711, 2006.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Projeções do Agronegócio**. Brasília - DF: MAPA, 2021.

MARETH, T. et al. Analysing the determinants of technical efficiency of dairy farms in Brazil. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 68, n. 2, p. 464–481, 11 fev. 2019.

MELO-BECERRA, L. A.; ANTONIO, •; OROZCO-GALLO, J. Technical efficiency for Colombian small crop and livestock farmers: A stochastic metafrontier approach for different production systems. **Journal of Productivity Analysis**, v. 47, p. 1–16, 2017.

MESQUITA, L. A. P. DE; MENDES, E. DE P. P. AGRICULTURA FAMILIAR, TRABALHO E ESTRATÉGIAS: a participação feminina na reprodução socioeconômica e cultural. **Espaço em Revista**, v. 14, n. 1, p. 14–23, 2012.

MONTOYA, M. A.; PASQUAL, C. A.; FINAMORE, E. B. **Panorama da bovinocultura no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Editora UPF, 2014.

MOREIRA, V. H.; BRAVO-URETA, B. E. Technical efficiency and metatechnology ratios for dairy farms in three southern cone countries: a stochastic meta-frontier model. **Journal of Productivity Analysis**, v. 33, n. 1, p. 33–45, 18, 2010.

NASCIMENTO, A. C. C. et al. Eficiência técnica da atividade leiteira em Minas Gerais: Uma aplicação de regressão quantílica. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 3, p. 783–789, 2012.

NIN-PRATT, A. Reducing the environmental efficiency gap in global livestock production. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 95, n. 5, p. 1294–1300, 2013.

NOVO, A. M. et al. Feasibility and competitiveness of intensive smallholder dairy farming in Brazil in comparison with soya and sugarcane: Case study of the Balde Cheio Programme. **Agricultural Systems**, v. 121, p. 63–72, 2013.

O'DONNELL, C. J.; RAO, D. S. P.; BATTESE, G. E. Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technology ratios. **Empirical Economics**, v. 34, n. 2, p. 231–255, 2008.

PEIXOTO, M. **Extensão rural no Brasil - uma abordagem histórica da legislação**. Brasília: 2008. Disponível em: <http://www.senado.gov.br/conleg/textos_discussao.htm>. Acesso em: 7 set. 2023.

PEIXOTO, M. Mudanças e desafios da extensão rural no Brasil e no mundo. Em: BUAINAIN, A. M. et al. (Eds.). **O mundo rural no Brasil do século 21: a formação de um novo padrão agrário e agrícola**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 891–924.

PEREIRA, M. N. et al. Indicadores de desempenho de fazendas leiteiras de Minas Gerais. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 68, n. 4, p. 1033–1042, 2016.

QUEIROZ, A. M. DE; SOUZA, L. G. DE S. E. Análise da produção de leite de vaca no estado do Acre. **Scientia Naturalis**, v. 3, n. 1, p. 97–104, 2021.

RAGAZZI, F. G. et al. Análise da variação estacional na produção de leite nas diferentes bacias leiteiras no Brasil. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 1, p. 976–988, 2021.

REINHARD, S.; LOVELL, C. A. K.; THIJSSEN, G. Econometric Estimation of Technical and Environmental Efficiency: An Application to Dutch Dairy Farms. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 81, n. 1, p. 44–60, 1999.

REINHARD, S.; LOVELL, C. A. K.; THIJSSEN, G. ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL EFFICIENCY VARIATION. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 89, n. January, p. 1054–1065, 2002.

REINHARD, S.; LOVELL, C. A. K.; THIJSSEN, G. J. Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables; estimated with SFA and DEA. **European Journal of Operational Research**, v. 121, n. 2, p. 287–303, 2000.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA - SEEG. **Emissões Estados**. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/>>. Acesso em: 1 abr. 2023.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL - SENAR. **Documento Norteador da Assistência Técnica e Gerencial**. Brasília, DF: Senar, 2022a.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL - SENAR. **Relatório Gestão Senar: Exercício 2021**. Brasília, DF: Senar, 2022b.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL - SENAR. **Assistência Técnica e Gerencial**. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/assistencia-tecnica-e-gerencial>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

SEÓ, H. L. S. et al. Avaliação do Ciclo de Vida na bovinocultura leiteira e as oportunidades ao Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 221–237, 19 jan. 2017.

SHORTALL, O. K.; BARNES, A. P. Greenhouse gas emissions and the technical efficiency of dairy farmers. **Ecological Indicators**, v. 29, p. 478–488, 2013.

SILVA, C. S. DE S.; BRAGAGNOLO, C. Eficiência técnica e ambiental da pecuária leiteira na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 16, n. 2, p. 242–261, 2018.

SECRETARIA ESPECIAL DE AGRICULTURA FAMILIAR E DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO - SITEMDA. **Agricultura familiar**. Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/sitemda/noticias/o-que-é-agricultura-familiar>>. Acesso em: 8 out. 2020.

SOARES, P.; SPOLADOR, H. F. S. Eficiência técnica da produção de milho no estado de São Paulo: uma abordagem por metafronteira estocástica. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, n. 4, p. 545–558, 2019.

TEDESCO, J. C. **Agricultura familiar: realidades e perspectivas**. Passo Fundo: Editora UPF, 1999.

TRAVASSOS, G. F. et al. Determinantes da eficiência técnica dos produtores de leite da Mesorregião da Zona da Mata - MG. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 13, n. 1,2,3, p. 63–92, 2016.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **Global Methane Pledge**. Disponível em: <<https://www.globalmethanepledge.org/>>. Acesso em: 27 out. 2023.

URDIALES, M. P.; LANSINK, A. O.; WALL, A. Eco-efficiency Among Dairy Farmers: The Importance of Socio-economic Characteristics and Farmer Attitudes. **Environmental and Resource Economics**, v. 64, n. 4, p. 559–574, 2016.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. **Dairy: World Markets and Trade**. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home>>. Acesso em: 23 mar. 2023.

VEIGA, J. E. DA. O Brasil rural ainda não encontrou seu eixo de desenvolvimento. **Estudos Avançados**, v. 15, n. 43, p. 101–119, 2001.

VILELA, D. et al. **Pecuária de leite no Brasil: cenários e avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa, 2016.

VILELA, D.; ANDRADE, R. O leite no Cerrado O que esperar em ganhos de produção e produtividade. **Revista de Política Agrícola**, n. 2, p. 66–78, 2018.

WILKINSON, J. Mercosul e produção familiar: abordagens teóricas e estratégias alternativas. **Estudos Sociedade e Agricultura**, p. 25–50, 1997.

ZOCCAL, R.; DE SOUZA, A. D.; GOMES, A. T. **Produção de leite na agricultura familiar**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2005.

APÊNDICE

Quadro A1 - Lista dos municípios que fizeram parte da análise

Continua

Região	UF	Município	Região	UF	Município
Norte	AM	Autazes	Sudeste	MG	Marilac
Norte	PA	Água Azul do Norte	Sudeste	MG	Mathias Lobato
Norte	PA	Aveiro	Sudeste	MG	Medina
Norte	PA	Itaituba	Sudeste	MG	Monte Alegre de Minas
Norte	PA	Monte Alegre	Sudeste	MG	Morro da Garça
Norte	PA	Novo Progresso	Sudeste	MG	Mutum
Norte	PA	Ourilândia do Norte	Sudeste	MG	Ninheira
Norte	PA	Placas	Sudeste	MG	Pedra Azul
Norte	PA	Rurópolis	Sudeste	MG	Piedade do Rio Grande
Norte	PA	São Félix do Xingu	Sudeste	MG	Piranguinho
Norte	PA	Trairão	Sudeste	MG	Poté
Norte	PA	Tucumã	Sudeste	MG	Prata
Norte	RO	Ariquemes	Sudeste	MG	Presidente Juscelino
Norte	RO	Cacoal	Sudeste	MG	Santa Maria de Itabira
Norte	RO	Guajará-Mirim	Sudeste	MG	Santa Vitória
Norte	RO	Jaru	Sudeste	MG	São João del Rei
Norte	RO	Nova Brasilândia D'Oeste	Sudeste	MG	São José do Goiabal
Norte	RO	Rolim de Moura	Sudeste	MG	São Lourenço
Nordeste	AL	Belém	Sudeste	MG	São Romão
Nordeste	AL	Belo Monte	Sudeste	MG	Senhora do Porto
Nordeste	AL	Craíbas	Sudeste	MG	Sobralia
Nordeste	AL	Jacaré dos Homens	Sudeste	MG	Soledade de Minas
Nordeste	AL	Olho d'Água das Flores	Sudeste	MG	Taquaraçu de Minas
Nordeste	AL	Olho d'Água do Casado	Sudeste	MG	Teófilo Otoni
Nordeste	AL	Oliveira	Sudeste	MG	Tocantins
Nordeste	AL	Palmeira dos Índios	Sudeste	MG	Ubá
Nordeste	AL	Santana do Ipanema	Sudeste	MG	Uberaba
Nordeste	AL	Traipu	Sudeste	MG	Uberlândia
Nordeste	BA	América Dourada	Sudeste	MG	Veríssimo
Nordeste	BA	Baixa Grande	Sudeste	RJ	Araucária
Nordeste	BA	Barro Alto	Sudeste	RJ	Barra do Piraí
Nordeste	BA	Boa Vista do Tupim	Sudeste	RJ	Bom Jardim
Nordeste	BA	Brejolândia	Sudeste	RJ	Cachoeiras de Macacu
Nordeste	BA	Cafarnaum	Sudeste	RJ	Duas Barras
Nordeste	BA	Caldeirão Grande	Sudeste	RJ	Italva
Nordeste	BA	Canarana	Sudeste	RJ	Itaperuna
Nordeste	BA	Candeal	Sudeste	RJ	Laje do Muriaé
Nordeste	BA	Capela do Alto Alegre	Sudeste	RJ	Miracema
Nordeste	BA	Capim Grosso	Sudeste	RJ	Natividade
Nordeste	BA	Caravelas	Sudeste	RJ	Quissamã
Nordeste	BA	Central	Sudeste	RJ	Rio das Flores
Nordeste	BA	Conceição da Feira	Sudeste	RJ	Santa Maria Madalena
Nordeste	BA	Conceição do Coité	Sudeste	RJ	Valença
Nordeste	BA	Cotegipe	Sudeste	RJ	Varre-Sai
Nordeste	BA	Euclides da Cunha	Sul	RS	Anta Gorda
Nordeste	BA	Gavião	Sul	RS	Antônio Prado
Nordeste	BA	Ibicuí	Sul	RS	Arroio do Padre
Nordeste	BA	Ibipeba	Sul	RS	Barão
Nordeste	BA	Ibirapuã	Sul	RS	Barra do Guarita
Nordeste	BA	Ibititá	Sul	RS	Barra Funda
Nordeste	BA	Ichu	Sul	RS	Barracão
Nordeste	BA	Iguaí	Sul	RS	Bom Progresso
Nordeste	BA	Ipirá	Sul	RS	Bom Retiro do Sul
Nordeste	BA	Irecê	Sul	RS	Campina das Missões

Região	UF	Município	Região	UF	Município
Nordeste	BA	Itanhém	Sul	RS	Campo Novo
Nordeste	BA	Itiúba	Sul	RS	Canguçu
Nordeste	BA	Jacobina	Sul	RS	Capão Bonito do Sul
Nordeste	BA	Jeremoabo	Sul	RS	Capão do Leão
Nordeste	BA	João Dourado	Sul	RS	Caseiros
Nordeste	BA	Lapão	Sul	RS	Cerrito
Nordeste	BA	Macaçuba	Sul	RS	Cerro Largo
Nordeste	BA	Mairi	Sul	RS	Crissiumal
Nordeste	BA	Miguel Calmon	Sul	RS	Cristal
Nordeste	BA	Morro do Chapéu	Sul	RS	Cruzaltense
Nordeste	BA	Mundo Novo	Sul	RS	Derrubadas
Nordeste	BA	Muquém do São Francisco	Sul	RS	Doutor Ricardo
Nordeste	BA	Nova Canaã	Sul	RS	Encantado
Nordeste	BA	Nova Fátima	Sul	RS	Entre Rios do Sul
Nordeste	BA	Ouriçangas	Sul	RS	Esperança do Sul
Nordeste	BA	Pé de Serra	Sul	RS	Estrela
Nordeste	BA	Pintadas	Sul	RS	Glorinha
Nordeste	BA	Pirituba	Sul	RS	Guaporé
Nordeste	BA	Presidente Dutra	Sul	RS	Horizontina
Nordeste	BA	Queimadas	Sul	RS	Ipê
Nordeste	BA	Quixabeira	Sul	RS	Jaboticaba
Nordeste	BA	Retirolândia	Sul	RS	Lagoa Vermelha
Nordeste	BA	Riachão do Jacuípe	Sul	RS	Lajeado do Bugre
Nordeste	BA	Ribeira do Pombal	Sul	RS	Morro Redondo
Nordeste	BA	Ruy Barbosa	Sul	RS	Nonoai
Nordeste	BA	Santaluz	Sul	RS	Nova Bréscia
Nordeste	BA	São Gabriel	Sul	RS	Nova Petrópolis
Nordeste	BA	São Gonçalo dos Campos	Sul	RS	Novo Machado
Nordeste	BA	São José do Jacuípe	Sul	RS	Novo Tiradentes
Nordeste	BA	Saúde	Sul	RS	Palmeira das Missões
Nordeste	BA	Senhor do Bonfim	Sul	RS	Paverama
Nordeste	BA	Serra Dourada	Sul	RS	Pelotas
Nordeste	BA	Serrolândia	Sul	RS	Picada Café
Nordeste	BA	Sítio do Mato	Sul	RS	Porto Mauá
Nordeste	BA	Tabocas do Brejo Velho	Sul	RS	Redentora
Nordeste	BA	Tapiramutá	Sul	RS	Relvado
Nordeste	BA	Valente	Sul	RS	Rio dos Índios
Nordeste	BA	Várzea da Roça	Sul	RS	Roca Sales
Nordeste	BA	Várzea do Poço	Sul	RS	Rondinha
Nordeste	BA	Várzea Nova	Sul	RS	Roque Gonzales
Nordeste	CE	Brejo Santo	Sul	RS	Sagrada Família
Nordeste	CE	Irauçuba	Sul	RS	Salvador do Sul
Nordeste	CE	Jaguaratama	Sul	RS	São José do Inhacorá
Nordeste	CE	Lavras da Mangabeira	Sul	RS	São José do Ouro
Nordeste	CE	Mauriti	Sul	RS	São Lourenço do Sul
Nordeste	CE	Milhã	Sul	RS	São Martinho
Nordeste	CE	Miraíma	Sul	RS	São Paulo das Missões
Nordeste	CE	Mombaça	Sul	RS	São Pedro das Missões
Nordeste	CE	Quixelô	Sul	RS	São Valentim do Sul
Nordeste	MA	Arari	Sul	RS	Sarandi
Nordeste	MA	Bacabal	Sul	RS	Sede Nova
Nordeste	MA	Bernardo do Mearim	Sul	RS	Teutônia
Nordeste	MA	Bom Lugar	Sul	RS	Três de Maio
Nordeste	MA	Igarapé Grande	Sul	RS	Três Passos
Nordeste	MA	Lago da Pedra	Sul	RS	Tucunduva
Nordeste	MA	Lago do Junco	Sul	RS	Tupandi
Nordeste	MA	Lago dos Rodrigues	Sul	RS	Tuparendi
Nordeste	MA	Lima Campos	Sul	RS	Turuçu
Nordeste	MA	Olho d'Água das Cunhãs	Sul	RS	Vespasiano Corrêa

Região	UF	Município	Região	UF	Município
Nordeste	MA	Pedreiras	Sul	RS	Viamão
Nordeste	MA	Presidente Dutra	Sul	RS	Westfália
Nordeste	MA	Santo Antônio dos Lopes	Sul	SC	Abelardo Luz
Nordeste	MA	São José dos Basílios	Sul	SC	Agronômica
Nordeste	MA	São Luís Gonzaga do Maranhão	Sul	SC	Água Doce
Nordeste	MA	São Pedro da Água Branca	Sul	SC	Alto Bela Vista
Nordeste	MA	Trizidela do Vale	Sul	SC	Araranguá
Nordeste	MA	Vitória do Mearim	Sul	SC	Balneário Gaivota
Nordeste	PB	Boa Ventura	Sul	SC	Bandeirante
Nordeste	PB	Boa Vista	Sul	SC	Braço do Norte
Nordeste	PB	Bom Sucesso	Sul	SC	Caçador
Nordeste	PB	Conceição	Sul	SC	Campo Alegre
Nordeste	PB	Coremas	Sul	SC	Catanduvas
Nordeste	PB	Diamante	Sul	SC	Concórdia
Nordeste	PB	Emas	Sul	SC	Cunhataí
Nordeste	PB	Itaporanga	Sul	SC	Ermo
Nordeste	PB	Pedra Branca	Sul	SC	Erval Velho
Nordeste	PB	Pombal	Sul	SC	Faxinal dos Guedes
Nordeste	PB	Santa Cruz	Sul	SC	Formosa do Sul
Nordeste	PB	Santa Inês	Sul	SC	Forquilha
Nordeste	PB	São Francisco	Sul	SC	Grão-Pará
Nordeste	PB	Sousa	Sul	SC	Gravatal
Nordeste	PE	Águas Belas	Sul	SC	Guaraciaba
Nordeste	PE	Angelim	Sul	SC	Herval d'Oeste
Nordeste	PE	Belo Jardim	Sul	SC	Ibicaré
Nordeste	PE	Bom Conselho	Sul	SC	Ipuçu
Nordeste	PE	Brejão	Sul	SC	Irati
Nordeste	PE	Caetés	Sul	SC	Irineópolis
Nordeste	PE	Calçado	Sul	SC	Jaborá
Nordeste	PE	Canhotinho	Sul	SC	Jacinto Machado
Nordeste	PE	Capoeiras	Sul	SC	Jardinópolis
Nordeste	PE	Correntes	Sul	SC	Joaçaba
Nordeste	PE	Garanhuns	Sul	SC	Lacerdópolis
Nordeste	PE	Iati	Sul	SC	Lajeado Grande
Nordeste	PE	Ibirajuba	Sul	SC	Laurentino
Nordeste	PE	Itaíba	Sul	SC	Macieira
Nordeste	PE	Jucati	Sul	SC	Maracajá
Nordeste	PE	Lagoa do Ouro	Sul	SC	Maravilha
Nordeste	PE	Lajedo	Sul	SC	Marema
Nordeste	PE	Palmeirina	Sul	SC	Monte Carlo
Nordeste	PE	Pedra	Sul	SC	Nova Erechim
Nordeste	PE	Pesqueira	Sul	SC	Novo Horizonte
Nordeste	PE	Saloá	Sul	SC	Ouro Verde
Nordeste	PE	Sanharó	Sul	SC	Paial
Nordeste	PE	São Bento do Una	Sul	SC	Palma Sola
Nordeste	PE	São João	Sul	SC	Palmitos
Nordeste	PE	Terezinha	Sul	SC	Papanduva
Nordeste	PE	Venturosa	Sul	SC	Passos Maia
Nordeste	PI	Batalha	Sul	SC	Pinhalzinho
Nordeste	PI	Bom Jesus	Sul	SC	Ponte Serrada
Nordeste	PI	Capitão de Campos	Sul	SC	Presidente Getúlio
Nordeste	PI	Corrente	Sul	SC	Princesa
Nordeste	PI	Cristino Castro	Sul	SC	Rio Negrinho
Nordeste	PI	Currais	Sul	SC	Salto Veloso
Nordeste	PI	Parnaguá	Sul	SC	Santa Rosa do Sul
Nordeste	PI	Piripiri	Sul	SC	São Bento do Sul
Nordeste	PI	Santa Luz	Sul	SC	São Carlos
Nordeste	PI	São José do Divino	Sul	SC	São João do Sul

Região	UF	Município	Região	UF	Município
Nordeste	RN	Acari	Sul	SC	São José do Cedro
Nordeste	RN	Açu	Sul	SC	São Lourenço do Oeste
Nordeste	RN	Afonso Bezerra	Sul	SC	São Ludgero
Nordeste	RN	Alto do Rodrigues	Sul	SC	Saudades
Nordeste	RN	Angicos	Sul	SC	Serra Alta
Nordeste	RN	Apodi	Sul	SC	Sombrio
Nordeste	RN	Barcelona	Sul	SC	Sul Brasil
Nordeste	RN	Bom Jesus	Sul	SC	Tigrinhos
Nordeste	RN	Carnaúba dos Dantas	Sul	SC	Timbé do Sul
Nordeste	RN	Ceará-Mirim	Sul	SC	Treze Tílias
Nordeste	RN	Cerro Corá	Sul	SC	Turvo
Nordeste	RN	Cruzeta	Sul	SC	União do Oeste
Nordeste	RN	Currais Novos	Sul	SC	Urubici
Nordeste	RN	Fernando Pedroza	Sul	SC	Vargeão
Nordeste	RN	Florânia	Sul	SC	Vargem Bonita
Nordeste	RN	Francisco Dantas	Sul	SC	Xaxim
Nordeste	RN	Ipangaçu	Centro-Oeste	DF	Brasília
Nordeste	RN	Itajá	Centro-Oeste	DF	Cabeceira Grande
Nordeste	RN	Jardim do Seridó	Centro-Oeste	DF	Padre Bernardo
Nordeste	RN	Jucurutu	Centro-Oeste	DF	Planaltina
Nordeste	RN	Lagoa de Velhos	Centro-Oeste	GO	Abadiânia
Nordeste	RN	Lagoa Nova	Centro-Oeste	GO	Adelândia
Nordeste	RN	Major Sales	Centro-Oeste	GO	Araçu
Nordeste	RN	Monte Alegre	Centro-Oeste	GO	Bela Vista de Goiás
Nordeste	RN	Paraú	Centro-Oeste	GO	Buriti de Goiás
Nordeste	RN	Parellhas	Centro-Oeste	GO	Cachoeira Dourada
Nordeste	RN	Parnamirim	Centro-Oeste	GO	Campestre de Goiás
Nordeste	RN	Patu	Centro-Oeste	GO	Caturai
Nordeste	RN	Pau dos Ferros	Centro-Oeste	GO	Cocalzinho de Goiás
Nordeste	RN	Pedro Avelino	Centro-Oeste	GO	Corumbá de Goiás
Nordeste	RN	Pureza	Centro-Oeste	GO	Cromínia
Nordeste	RN	Rafael Fernandes	Centro-Oeste	GO	Damolândia
Nordeste	RN	Ruy Barbosa	Centro-Oeste	GO	Gouvelândia
Nordeste	RN	Santana do Seridó	Centro-Oeste	GO	Guapó
Nordeste	RN	São Francisco do Oeste	Centro-Oeste	GO	Guarinos
Nordeste	RN	São José do Seridó	Centro-Oeste	GO	Hidrolândia
Nordeste	RN	São Paulo do Potengi	Centro-Oeste	GO	Hidrolina
Nordeste	RN	São Pedro	Centro-Oeste	GO	Inaciolândia
Nordeste	RN	São Rafael	Centro-Oeste	GO	Inhumas
Nordeste	RN	Serra Caiada	Centro-Oeste	GO	Itapaci
Nordeste	RN	Serra Negra do Norte	Centro-Oeste	GO	Itumbiara
Nordeste	RN	Sítio Novo	Centro-Oeste	GO	Jaraguá
Nordeste	RN	Taboleiro Grande	Centro-Oeste	GO	Jataí
Nordeste	RN	Taipu	Centro-Oeste	GO	Mairipotaba
Nordeste	RN	Tenente Laurentino Cruz	Centro-Oeste	GO	Mossâmedes
Nordeste	RN	Timbaúba dos Batistas	Centro-Oeste	GO	Niquelândia
Nordeste	RN	Vera Cruz	Centro-Oeste	GO	Padre Bernardo
Nordeste	SE	Feira Nova	Centro-Oeste	GO	Palmeiras de Goiás
Nordeste	SE	Frei Paulo	Centro-Oeste	GO	Petrolina de Goiás
Nordeste	SE	Nossa Senhora da Glória	Centro-Oeste	GO	Pilar de Goiás
Nordeste	SE	Poço Redondo	Centro-Oeste	GO	Pontalina
Nordeste	SE	Poço Verde	Centro-Oeste	GO	Rubiataba
Nordeste	SE	Porto da Folha	Centro-Oeste	GO	Santa Bárbara de Goiás
Nordeste	SE	Propriá	Centro-Oeste	GO	Santa Cruz de Goiás
Sudeste	ES	Anchieta	Centro-Oeste	GO	São Miguel do Passa Quatro
Sudeste	ES	Atílio Vivácqua	Centro-Oeste	GO	Trindade
Sudeste	ES	Cachoeiro de Itapemirim	Centro-Oeste	GO	Vila Propício
Sudeste	ES	Castelo	Centro-Oeste	MS	Alcinópolis
Sudeste	ES	Conceição do Castelo	Centro-Oeste	MS	Amambai

Região	UF	Município	Região	UF	Município
Sudeste	ES	Itapemirim	Centro-Oeste	MS	Anastácio
Sudeste	ES	Muqui	Centro-Oeste	MS	Anaurilândia
Sudeste	ES	Presidente Kennedy	Centro-Oeste	MS	Aparecida do Taboado
Sudeste	ES	Vargem Alta	Centro-Oeste	MS	Bandeirantes
Sudeste	MG	Águas Vermelhas	Centro-Oeste	MS	Bataguassu
Sudeste	MG	Aimorés	Centro-Oeste	MS	Batayporã
Sudeste	MG	Araçaí	Centro-Oeste	MS	Brasilândia
Sudeste	MG	Araçuaí	Centro-Oeste	MS	Caarapó
Sudeste	MG	Barbacena	Centro-Oeste	MS	Campo Grande
Sudeste	MG	Braúnas	Centro-Oeste	MS	Cassilândia
Sudeste	MG	Brazópolis	Centro-Oeste	MS	Chapadão do Sul
Sudeste	MG	Cachoeira de Pajeú	Centro-Oeste	MS	Corumbá
Sudeste	MG	Cachoeira Dourada	Centro-Oeste	MS	Costa Rica
Sudeste	MG	Caeté	Centro-Oeste	MS	Deodápolis
Sudeste	MG	Campina Verde	Centro-Oeste	MS	Dourados
Sudeste	MG	Campo Florido	Centro-Oeste	MS	Eldorado
Sudeste	MG	Capinópolis	Centro-Oeste	MS	Fátima do Sul
Sudeste	MG	Carmo de Minas	Centro-Oeste	MS	Glória de Dourados
Sudeste	MG	Carmo do Cajuru	Centro-Oeste	MS	Guia Lopes da Laguna
Sudeste	MG	Casa Grande	Centro-Oeste	MS	Iguatemi
Sudeste	MG	Comendador Gomes	Centro-Oeste	MS	Inocência
Sudeste	MG	Comercinho	Centro-Oeste	MS	Itaquiraí
Sudeste	MG	Conceição das Alagoas	Centro-Oeste	MS	Ivinhema
Sudeste	MG	Conceição dos Ouros	Centro-Oeste	MS	Japorã
Sudeste	MG	Conselheiro Lafaiete	Centro-Oeste	MS	Jaraguari
Sudeste	MG	Coroaci	Centro-Oeste	MS	Jardim
Sudeste	MG	Coronel Murta	Centro-Oeste	MS	Jateí
Sudeste	MG	Cristiano Ottoni	Centro-Oeste	MS	Miranda
Sudeste	MG	Curral de Dentro	Centro-Oeste	MS	Mundo Novo
Sudeste	MG	Curvelo	Centro-Oeste	MS	Nova Alvorada do Sul
Sudeste	MG	Desterro de Entre Rios	Centro-Oeste	MS	Nova Andradina
Sudeste	MG	Dionísio	Centro-Oeste	MS	Novo Horizonte do Sul
Sudeste	MG	Divinésia	Centro-Oeste	MS	Paranaíba
Sudeste	MG	Dom Viçoso	Centro-Oeste	MS	Paranhos
Sudeste	MG	Engenheiro Caldas	Centro-Oeste	MS	Ponta Porã
Sudeste	MG	Entre Rios de Minas	Centro-Oeste	MS	Rio Verde de Mato Grosso
Sudeste	MG	Ferros	Centro-Oeste	MS	Rochedo
Sudeste	MG	Frei Gaspar	Centro-Oeste	MS	São Gabriel do Oeste
Sudeste	MG	Gouveia	Centro-Oeste	MS	Selvíria
Sudeste	MG	Governador Valadares	Centro-Oeste	MS	Sidrolândia
Sudeste	MG	Guanhães	Centro-Oeste	MS	Taquarussu
Sudeste	MG	Gurinhata	Centro-Oeste	MS	Terenos
Sudeste	MG	Ijaci	Centro-Oeste	MS	Três Lagoas
Sudeste	MG	Ingai	Centro-Oeste	MS	Vicentina
Sudeste	MG	Inimutaba	Centro-Oeste	MT	Água Boa
Sudeste	MG	Itambé do Mato Dentro	Centro-Oeste	MT	Cáceres
Sudeste	MG	Ituiutaba	Centro-Oeste	MT	Campinápolis
Sudeste	MG	Itumirim	Centro-Oeste	MT	Confresa
Sudeste	MG	Itutinga	Centro-Oeste	MT	Curvelândia
Sudeste	MG	Jaboticatubas	Centro-Oeste	MT	Mirassol d'Oeste
Sudeste	MG	Jacinto	Centro-Oeste	MT	Nova Xavantina
Sudeste	MG	Japonvar	Centro-Oeste	MT	Porto Esperidião
Sudeste	MG	Jordânia	Centro-Oeste	MT	Rio Branco
Sudeste	MG	Ladainha	Centro-Oeste	MT	Salto do Céu
Sudeste	MG	Lavras	Centro-Oeste	MT	Santa Terezinha
Sudeste	MG	Luminárias	Centro-Oeste	MT	São José dos Quatro Marcos
Sudeste	MG	Madre de Deus de Minas	Centro-Oeste	MT	Vila Rica

Fonte: Elaborada pela autora, a partir de dados do Senar

Conclusão

Tabela A1 - Testes para escolha do modelo mais adequado de fronteira estocástica

Forma funcional	AIC	BIC	LL
Fronteira Estocástica Simples			
MQO	6229,999	6268,816	-3109
Cobb-Douglas	5723,969	5782,194	-2852,985
Cobb-Douglas com variáveis ineficiência	5612,031	5689,665	-2794,016
Translog	4611,688	4766,955	-2281,844
Translog com variáveis ineficiência	4463,567	4638,243	-2204,784
Fronteira Estocástica Brasil com dummies			
MQO	5839,24	5903,935	-2909,62
Cobb-Douglas	5229,806	5313,909	-2601,903
Cobb-Douglas com variáveis ineficiência	5125,32	5228,832	-2546,66
Translog	4231,47	4412,615	-2087,735
Translog com variáveis ineficiência	4088,507	4289,061	-2013,254
Fronteira Estocástica Região Norte			
MQO	310,380	332,522	-149,190
Cobb-Douglas	275,164	308,378	-128,582
Cobb-Douglas com Ineficiência	272,9	317,184	-124,45
Translog	280,442	369,011	-116,221
Translog com Ineficiência	278,332	377,971	-112,166
Fronteira Estocástica Região Nordeste			
MQO	2889,324	2922,909	-1438,662
Cobb-Douglas	2608,218	2658,595	-1295,109
Cobb-Douglas com Ineficiência	2573,254	2640,423	-1274,627
Translog	2104,268	2238,605	-1028,134
Translog com Ineficiência	2051,357	2202,487	-998,678
Fronteira Estocástica Região Sudeste			
MQO	1003,168	1031,861	-495,584
Cobb-Douglas	928,364	971,404	-455,182
Cobb-Douglas com Ineficiência	911,930	969,317	-443,965
Translog	739,960	854,733	-345,980
Translog com Ineficiência	724,937	854,057	-335,468
Fronteira Estocástica Região Sul			
MQO	276,825	304,75	-132,412
Cobb-Douglas	19,065	60,952	-0,532
Cobb-Douglas com Ineficiência	-2,856	52,992	13,428
Translog	-121,371	-9,671	84,685
Translog com Ineficiência	-142,885	-17,223	98,442
Fronteira Estocástica Região Centro-Oeste			
MQO	865,385	893,641	-426,692
Cobb-Douglas	814,590	856,973	-398,295
Cobb-Douglas com Ineficiência	798,606	855,117	-387,303
Translog	667,600	775,914	-310,800
Translog com Ineficiência	642,927	770,078	-294,463

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações da Fronteira Estocástica.

Tabela A2 - Resultado do teste de Razão de Verossimilhança para identificar a forma funcional mais adequada para estimação da fronteira de produção

Modelo	Hipótese	LR	Graus de liberdade	τ_{kp}	Resultado
Modelo I - Fronteira Estocástica Simples	H ₀ = MQO H ₁ = Cobb-Douglas	512,030	1	5,412	Rejeita-se H ₀
	H ₀ = Cobb-Douglas H ₁ = Cobb-Douglas com variáveis ineficiência	117,938	3	10,501	Rejeita-se H ₀
	H ₀ = MQO H ₁ = Translog	1654,312	16	31,353	Rejeita-se H ₀
	H ₀ = Translog H ₁ = Translog com variáveis ineficiência	154,120	3	10,501	Rejeita-se H ₀
	H ₀ = Cobb-Douglas H ₁ = Translog	1142,282	14	28,485	Rejeita-se H ₀
	H ₀ = Cobb-Douglas com variáveis ineficiência H ₁ = Translog com variáveis ineficiência	-1178,464	14	28,485	Não rejeita H ₀
	Modelo I - Fronteira Estocástica Simples com <i>Dummies</i>	H ₀ = MQO H ₁ = Cobb-Douglas	615,434	1	5,412
H ₀ = Cobb-Douglas H ₁ = Cobb-Douglas com variáveis ineficiência		110,486	3	10,501	Rejeita-se H ₀
H ₀ = MQO H ₁ = Translog		1643,770	16	31,353	Rejeita-se H ₀
H ₀ = Translog H ₁ = Translog com variáveis ineficiência		148,962	3	10,501	Rejeita-se H ₀
H ₀ = Cobb-Douglas H ₁ = Translog		-1028,336	14	28,485	Não rejeita H ₀
H ₀ = Cobb-Douglas com variáveis ineficiência H ₁ = Translog com variáveis ineficiência		1066,812	14	28,485	Rejeita-se H ₀
Modelo III - Metafronteira		H ₀ = Metafronteira Cobb-Douglas H ₁ = Metafronteira Translog	123,142	14	28,485

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações da Fronteira Estocástica.

Nota: O valor crítico do teste de Razão de Verossimilhança (LR) para escolha da forma funcional mais adequada foi obtido da tabela de Kodde e Palm (1986), com nível de significância de 1%.

Tabela A3 - Teste para verificar a presença de ineficiência

Forma Funcional	Hipótese testada	Teste <i>t</i> de Student	Prob<=z	Resultado
Translog	H ₀ : Não há componente de ineficiência	z = -42.560	Pr = 0,0000	Rejeita H ₀
	H ₁ : Há componente de ineficiência			
Cobb-Douglas	H ₀ : Não há componente de ineficiência	z = -29.653	Pr = 0,0000	Rejeita H ₀
	H ₁ : Há componente de ineficiência			

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações da Fronteira Estocástica

Tabela A4 - Resultado do teste de Razão de Verossimilhança para identificar se os produtores das cinco macrorregiões compartilham ou não da mesma tecnologia

Hipótese	LR	Graus de liberdade	χ^2	Resultado
H ₀ = Fronteira Estocástica Simples com uso de Translog H ₁ = Fronteira Estocástica das Cinco Macrorregiões com uso de Translog	1124,902	107	135,8	Rejeita-se H ₀
H ₀ = Fronteira Estocástica Simples com uso de Cobb-Douglas H ₁ = Fronteira Estocástica das Cinco Macrorregiões com uso de Cobb-Douglas	1154,198	47	69,96	Rejeita-se H ₀
H ₀ = Fronteira Estocástica com <i>Dummies</i> com uso de Translog H ₁ = Fronteira Estocástica das Cinco Macrorregiões com uso de Translog	741,842	103	135,8	Rejeita-se H ₀
H ₀ = Fronteira Estocástica com <i>Dummies</i> com uso de Cobb-Douglas H ₁ = Fronteira Estocástica das Cinco Macrorregiões com uso de Cobb-Douglas	659,486	43	69,9	Rejeita-se H ₀

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações da Fronteira Estocástica.

Nota: O valor crítico da estatística do teste para identificar se os produtores apresentam a mesma tecnologia foi obtido da tabela de distribuição de Qui-Quadrado (χ^2), com nível de significância de 1%. Ao se rejeitar a hipótese nula (H₀), assume-se que há heterogeneidade tecnológica entre os produtores e que o modelo a ser estimado deve ser o de metafronteira.

Tabela A5 - Valores para o teste Qui-Quadrado na Análise de Correspondência Múltipla

Associações	Pearson Chi ²	Probabilidade	Resultado
Eficiência Técnica/Eficiência Ambiental	4,800	Pr = 0,000	Existe associação
Produção de Leite/Eficiência Ambiental	1,100	Pr = 0,000	Existe associação
Produção de Leite/ Eficiência Técnica	1,300	Pr = 0,000	Existe associação
Regiões/Produção de Leite	1,300	Pr = 0,000	Existe associação
Regiões/Eficiência Técnica	1,200	Pr = 0,000	Existe associação
Regiões/Eficiência Ambiental	1,400	Pr = 0,000	Existe associação

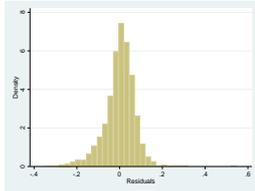
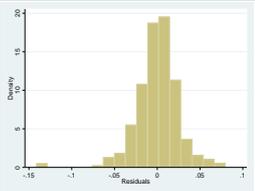
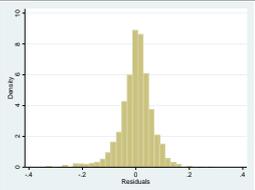
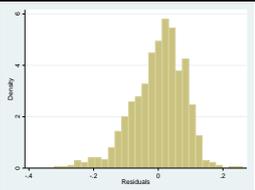
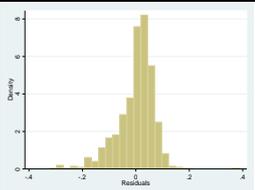
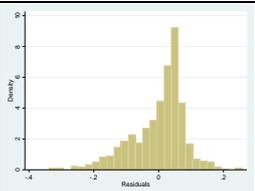
Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações estatísticas para ACM.

Tabela A6 - Decomposição inercial - Análise de Correspondência Múltipla

Dimensão	Inércia Principal	Percentual (%)	Percentual Acumulado (%)
Dimensão 1	0,642827	19,78	19,78
Dimensão 2	0,443832	13,66	33,44
Dimensão 3	0,326923	10,06	43,49
Dimensão 4	0,272187	8,37	51,87
Dimensão 5	0,268905	8,27	60,14
Dimensão 6	0,250369	7,70	67,85
Dimensão 7	0,247248	7,61	75,46
Dimensão 8	0,203962	6,28	81,73
Dimensão 9	0,187644	5,77	87,50
Dimensão 10	0,152752	4,70	92,20
Dimensão 11	0,109418	3,37	95,57
Dimensão 12	0,105177	3,24	98,81
Dimensão 13	0,038757	1,19	100
Total	3,25	100	

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações estatísticas para ACM.

Tabela A7 - Testes aplicados nas regressões múltiplas

Modelo	Teste	Resultado
Brasil	Heterocedasticidade	<i>Brusch-Pagan</i> (522,68 p -value < 0,001) <i>White</i> (542,67 p -value < 0,01)
	Multicolinearidade	VIF = 1,74
	Normalidade dos resíduos	
Norte	Heterocedasticidade	<i>Brusch-Pagan</i> (98,16 p -value < 0,001) <i>White</i> (26,51 p -value < 0,01)
	Multicolinearidade	VIF = 1,08
	Normalidade dos resíduos	
Nordeste	Heterocedasticidade	<i>Brusch-Pagan</i> (270,11 p -value < 0,001) <i>White</i> (97,35 p -value < 0,01)
	Multicolinearidade	VIF = 1,04
	Normalidade dos resíduos	
Sudeste	Heterocedasticidade	<i>Brusch-Pagan</i> (74,81 p -value < 0,001) <i>White</i> (58,52 p -value < 0,01)
	Multicolinearidade	VIF = 1,07
	Normalidade dos resíduos	
Sul	Heterocedasticidade	<i>Brusch-Pagan</i> (222,52 p -value < 0,001) <i>White</i> (96,64 p -value < 0,01)
	Multicolinearidade	VIF = 1,05
	Normalidade dos resíduos	
Centro-Oeste	Heterocedasticidade	<i>Brusch-Pagan</i> (96,24 p -value < 0,001) <i>White</i> (67,37 p -value < 0,01)
	Multicolinearidade	VIF = 1,06
	Normalidade dos resíduos	

Fonte: Elaborada pela autora, a partir das estimações econométricas.

ANEXO

Figura A1 - Autorização do Senar para uso dos dados da ATeG



AUTORIZAÇÃO

O Serviço Nacional de Aprendizagem Rural-Senar, **AUTORIZA Mariza de Almeida**, inscrita no CPF sob nº 030.561.790-76, utilizar os dados referentes às propriedades atendidas pelo programa de Assistência Técnica e Gerencial do Senar, relativos a comercialização, volume de leite, preço, custos de produção, rebanho, tamanho das propriedades e demais dados socioeconômicos única e exclusivamente para fundamentar tese de doutorado intitulada "Eficiência técnica e ambiental na produção brasileira de leite bovino".

Brasília, 16 de maio de 2023.


Andréa Barbosa Alves
Diretora de Assistência Técnica e Gerencial
Senar Central