



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Ciências Sociais

Faculdade de Ciências Econômicas

Caio Rodrigues Gomes Leite

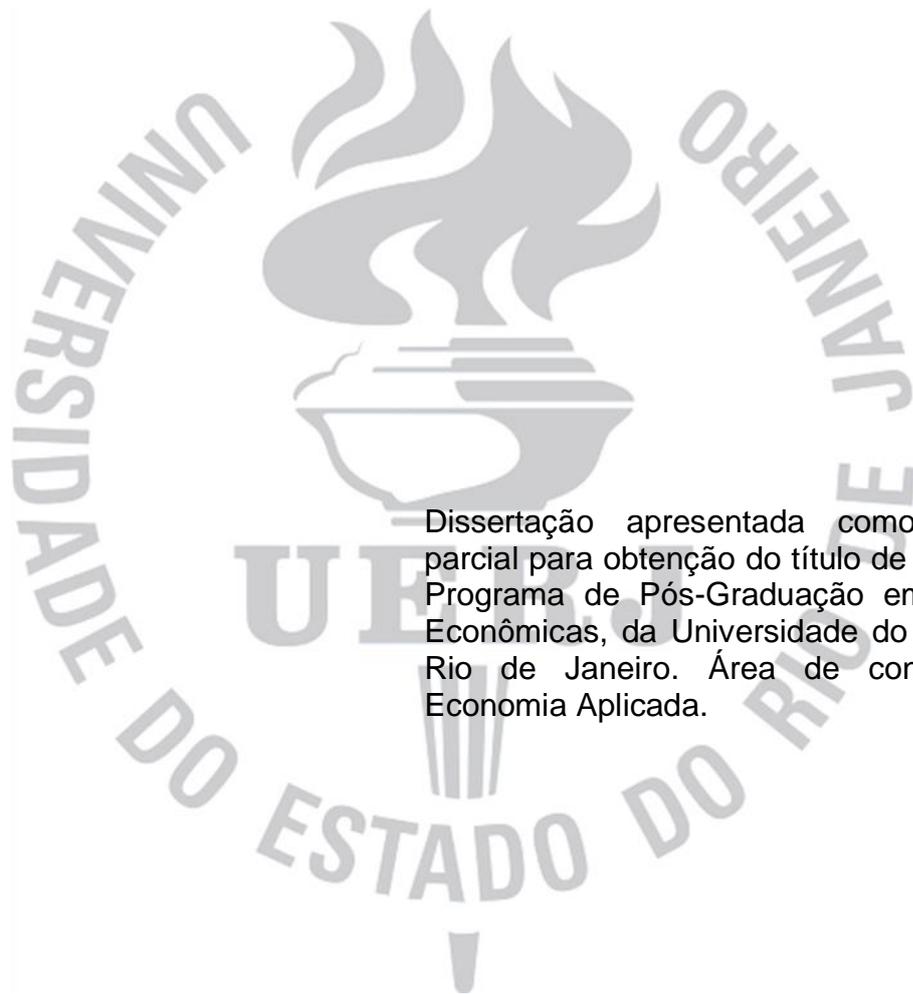
**Evolução da agropecuária e suas consequências sobre o
desmatamento: uma análise da eficiência agropecuária dos
municípios do Brasil com foco na Amazônia Legal**

Rio de Janeiro

2021

Caio Rodrigues Gomes Leite

**Evolução da agropecuária e suas consequências sobre o desmatamento: uma
análise da eficiência agropecuária dos municípios do Brasil com foco na
Amazônia Legal**



Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Economia Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Salazar Pessoa Brandão

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Marinho

Rio de Janeiro

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CCS/B

L533 Leite, Caio Rodrigues Gomes.
Evolução da agropecuária e suas consequências sobre o desmatamento: uma análise da eficiência agropecuária dos municípios do Brasil com foco na Amazônia Legal / Caio Rodrigues Gomes Leite .– 2021.
73 f.
Orientador: Antônio Salazar Pêsoa Brandão.
Coorientador: Alexandre Marinho.
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Econômicas.
Bibliografia: f.64-73.
1. Economia agrícola – Amazônia – Teses. 2. Agropecuária – Amazônia – Teses. 3. Desmatamento - Amazônia – Teses. I. Brandão, Antônio Salazar Pêsoa, 1949- . II. Marinho, Alexandre. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Econômicas. IV. Título. CDU 33:63(811)

Bibliotecária: Regina Souza do Patrocinio CRB7/4954

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Caio R. Gomes Leite.

Assinatura

04/03/2022.

Data

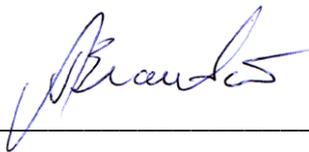
Caio Rodrigues Gomes Leite

Evolução da agropecuária e suas consequências sobre o desmatamento: uma análise da eficiência agropecuária dos municípios do Brasil com foco na Amazônia Legal

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Ciências Econômicas, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Economia Aplicada.

Aprovado em 29 de janeiro de 2021.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Antônio Salazar Pessoa Brandão (Orientador)
Faculdade de Ciências Econômicas - UERJ



Prof. Dr. Alexandre Marinho (Coorientador)
Faculdade de Ciências Econômicas - UERJ



Prof. Dr. José Gustavo Féres
Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

Rio de Janeiro
2021

AGRADECIMENTOS

Não podia deixar de começar a agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Salazar Pessôa Brandão e ao coorientador Prof. Dr. Alexandre Marinho, por estarem sempre dispostos a me ajudar e a me orientar com paciência, sem eles esse trabalho não seria possível. O meu sincero: MUITO OBRIGADO!

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – (Código de Financiamento 001) pelo apoio financeiro para o presente trabalho.

Aos meus professores do PPGCE, que muito me inspiraram durante essa trajetória. Aos professores Andrea Ugolini, Elcyon Caiado, Fernando Aiube, Luiz Fernando, Mauricio Canêdo, além dos meus orientadores: Antonio Salazar e Alexandre Marinho que foram imprescindíveis para a minha formação e também a professora Gabriela Fernandez Sanchez por ter me ensinado muito sobre pesquisa acadêmica.

Aos amigos que fiz durante esses dois anos que estão sempre ao meu lado me ajudando e dando força. À Juliana Lima e a Luana Carvalho pelo incentivo e apoio durante todo o processo. E ao Jacques, meu companheiro de vida, obrigado pelo incentivo e pelas palavras de apoio.

Por fim, agradeço minha família, meus pais, tios e tias que sempre me incentivam e apoiam. E um agradecimento especial a minha irmã, que está sempre ao meu lado incentivando e dando bons conselhos.

RESUMO

LEITE, C.R.G. *Evolução da agropecuária e suas consequências sobre o desmatamento: uma análise da eficiência agropecuária dos municípios do Brasil com foco na Amazônia Legal*. 2021. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciências Econômicas) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

O presente trabalho realizou uma análise do crescimento da atividade agropecuária na região da Amazônia e o consequente aumento do desmatamento. Além disso, foi investigado se a diferença da produtividade da terra observada na agropecuária da região da Amazônia Legal pode ser justificada pela baixa eficiência e, para isso, mediu-se a eficiência agropecuária dos municípios da região comparativamente com os demais municípios do Brasil, além de ter utilizado o desmatamento como um *output* indesejável. Para tanto, utilizou-se os dados do Censo Agropecuário (2006) de 3.520 municípios do Brasil referentes a quinze variáveis: treze inputs (área de lavoura e pastagens, adubos, agrotóxicos, transporte etc.), um output desejável (valor da produção) e um output indesejável (desmatamento). Empregou-se o modelo *Data Envelopment Analysis* - DEA considerando retornos variáveis de escala (BCC) com orientação input, o modelo de *bad output*, além do modelo de *Stochastic Frontier Analysis* - SFA. Os resultados demonstraram que municípios com alto nível de desmatamento apresentam correlação positiva entre desmatamento e eficiência, sugerindo que, ao aumentar ainda mais o desmatamento, aumenta-se a eficiência. Municípios com nível de desmatamento baixo apresentaram correlação negativa indicando que aqueles que já não desmatam, ou desmatam pouco, apresentam menos incentivos para desmatar. Além disso, os municípios da Amazônia Legal apresentaram em média menor eficiência em relação aos demais municípios.

Palavras-chave: Amazônia Legal. Agropecuária; Desmatamento. DEA. *Data Envelopment Analysis*. SFA. Fronteira estocástica.

ABSTRACT

LEITE, C.R.G. *Evolution of agriculture and its consequences on deforestation: an analysis of agricultural efficiency in Brazilian municipalities with a focus on the Legal Amazon*. 2021. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciências Econômicas) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

The study analyzed the growth of agricultural activity in the Amazon region and the consequent increase in deforestation. In addition, it was investigated whether the difference in land productivity observed in agriculture in the region of the Legal Amazon can be justified by low efficiency and, for that purpose, the agricultural efficiency of the municipalities in the region was measured in comparison with the other in Brazil, and deforestation was used as an undesirable output. Therefore, it was used the data of Agricultural Census (2006) of 3,520 municipalities in Brazil with fifteen variables: thirteen inputs (crop and pasture area, fertilizers, pesticides, transportation, etc.), a desirable output (production value) and an undesirable output (deforestation). It was used: the Data Envelopment Analysis – DEA model (considering variable returns of scale with input orientation), the bad output model and the Stochastic Frontier Analysis - SFA model. The results showed that municipalities with a high level of deforestation presented a positive correlation between deforestation and efficiency, suggesting that when deforestation is increased, the efficiency also increases. Municipalities with low deforestation level showed a negative correlation, indicating that those that no longer deforest, or deforest less, have fewer incentives to deforest. In addition, municipalities in the Legal Amazon showed, on average, lower efficiency compared to other municipalities.

Keywords: Legal Amazon. Agriculture. Deforestation. DEA. Data Envelopment Analysis. SFA. Stochastic Frontier Analysis.

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

BCC	Banker, Charnes e Cooper
CCR	Charnes, Copper e Rhodes
COLS	<i>Corrected Ordinary Least Square</i>
DMUs	Decision Making Units
DEA	Data Envelopment Analysis
FDH	<i>Free Disposal Hull</i>
SFA	<i>Stochastic frontier analysis</i>
ET	Eficiência técnica
EA	Eficiência alocativa
EE	Eficiência econômica total
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Participação Agropecuária na região da Amazônia.....	13
Gráfico 2 -	Evolução da pastagem na Amazônia Legal e no restante do Brasil entre 1985 e 2019 (milhões de hectares)	14
Gráfico 3 -	Participação de pastagens e agricultura na AM Legal na área de pastagens e agricultura no Brasil (%)	15
Gráfico 4 -	Relação entre produção e produtividade	17
Gráfico 5 -	Eficiência insumo orientada	22
Gráfico 6 -	Eficiência produto orientada	23
Gráfico 7 -	Exemplificação das Funções Distância Direcionais	35
Gráfico 8 -	Evidências de não proporcionalidade entre inputs e outputs ...	455
Gráfico 9 -	Correlação entre Desmatamento e Eficiência	51
Gráfico 10 -	Correlação entre Desmatamento e Eficiência (por nível de desmatamento)	52
Gráfico 11 -	Relação entre Desmatamento e área de floresta (por nível de desmatamento)	53
Gráfico 12 -	Mapa demonstrativo dos municípios e suas eficiências	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Evolução do uso da terra na Amazônia (em milhões de ha).....	13
Tabela 2 -	Área com agricultura e pastagens: Brasil e Amazônia Legal (em milhões de ha)	14
Tabela 3 -	Vantagens e desvantagens dos modelos de eficiência	19
Tabela 4 -	Variáveis utilizadas como inputs e outputs	44
Tabela 5 -	Estatísticas descritivas dos inputs e outputs selecionados (modelos 1 e 2)	47
Tabela 6 -	Estatísticas descritivas dos inputs e outputs selecionados (modelos 3,4 e 5)	48
Tabela 7 -	Resultados modelos 1 e 2	49
Tabela 8 -	Resultados modelo 3.....	55
Tabela 9 -	Resumo intervalo de confiança das DMUs (modelo 3)	56
Tabela 10 -	Resultado do modelo 4	56
Tabela 11 -	Resumo intervalo de confiança das DMUs (modelo 4)	57
Tabela 12 -	Resultados modelo 5.....	58

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	10
1	OBJETIVOS	11
2	MARCO TEÓRICO	12
2.1	Medidas de eficiência	20
2.2	Análise Envoltória de Dados (DEA)	24
2.2.1	<u>Modelo Charnes, Copper e Rhodes (CCR)</u>	25
2.2.2	<u>Modelo Banker, Charnes e Cooper (BCC)</u>	27
2.2.3	<u>Bootstrap</u>	29
2.2.4	<u>Modelo de <i>bad output</i> ou direcional</u>	32
2.2.5	<u>Modelo DEA na agropecuária</u>	36
2.3	Fronteira Estocástica (SFA)	38
2.3.1	<u>Modelo SFA na agropecuária</u>	41
3	METODOLOGIA	43
3.1	Especificação dos Modelos	43
4	RESULTADOS	49
	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	64

INTRODUÇÃO

A agropecuária vem ganhando espaço na região da Amazônia Legal, com o passar dos anos, adentrando a área de floresta com consequente aumento do desmatamento. Grande parte desse desmatamento recente resulta da pecuária de grande e médio porte tratando-se de uma pecuária de baixa produtividade. Segundo Homma (2010) seria possível reduzir a área de pastagens pela metade e manter o mesmo rebanho mediante o aumento da produtividade. Quanto à agricultura, não é diferente: a produtividade da mandioca no Pará (maior produtor) foi de 13,6 t/ha em 2019, enquanto, no Paraná (segundo produtor), a produtividade foi de 23 t/ha. O Pará produz 3,7 milhões de toneladas em aproximadamente 270 mil hectares, o Paraná produz 3,2 milhões em apenas 138 mil.

Segundo Ahearn et al. (1998), diferenças na produtividade da agropecuária ao longo do tempo, podem resultar de três fatores: **1)** Diferenças na eficiência (menos que o máximo de produto é produzido a partir de uma cesta de insumos); **2)** Variação na escala ou no nível de produção ao longo do tempo, quando o produto por unidade de insumo varia com a escala de produção; ou **3)** Mudança tecnológica. Além disso, limitações nas condições naturais, como por exemplo o clima, podem afetar a produtividade.

Nesse contexto, o presente trabalho busca investigar se eventuais diferenças de produtividade da terra observada na agropecuária da região da Amazônia Legal podem ser justificadas pela baixa eficiência e pelo aumento do desmatamento.

Para tanto, este trabalho encontra-se dividido da seguinte maneira: na terceira seção contém uma revisão de literatura mostrando a evolução da agropecuária na região da Amazônia Legal e uma revisão dos principais modelos econômicos utilizados na literatura para medir eficiência na agricultura (DEA e SFA). Na quarta seção é apresentado os modelos, detalhando a base de dados utilizada, seguido pelos resultados dos modelos estimados. Por fim, na última seção, apresentam-se as principais conclusões.

1. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo mapear o crescimento da atividade agropecuária na região da Amazônia e o conseqüente aumento do desmatamento. Além disso, pretende-se investigar se eventuais diferenças da produtividade da terra na região da Amazônia Legal podem ser justificadas pela baixa eficiência e para isso mede-se a eficiência agropecuária dos municípios da região comparativamente com o Brasil utilizando os modelos DEA e SFA.

2. MARCO TEÓRICO

O Brasil tem muitas riquezas naturais e a Amazônia é uma de suas maiores riquezas. A Amazônia Legal abrange cerca de 60% do território brasileiro dividida em nove estados com diferentes tipos de atividade econômica, social e política. São eles: a totalidade dos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins e parte do estado do Maranhão. A região abriga em torno de 23 milhões de pessoas (12% do total de habitantes do Brasil), segundo o censo (2010) e sozinha responde por quase um quinto das reservas de água doce do mundo. Sua rica biodiversidade e o possível impacto climático decorrente de seu desaparecimento expõe sua importância e seu valor a nível global.

A área total desmatada da Amazônia brasileira, até julho de 2019, segundo Miranda, Martinho e Carvalho (2020), cartografada pelo Programa Prodes do INPE, equivale a uma superfície de 719.014 km², equivalentes a 18,9% da parte florestal do bioma Amazônia e a 17,1% de sua extensão total. Esta área seria superior às superfícies totais, conjuntamente, do Japão e da Alemanha, respectivamente, a terceira e a quarta economia do mundo (HOMMA ET AL., 2020).

Segundo Margulis (2003) a região amazônica enfrenta enormes desafios, incluindo a falta de consenso sobre estratégias de desenvolvimento; falta de serviços sociais, infraestrutura e transporte adequados; ambiguidades sobre direitos de propriedade e conflitos de uso da terra; dificuldades para controlar desmatamentos e queimadas; o papel das comunidades indígenas no desenvolvimento e na gestão ambiental; baixa capacidade institucional e governança fraca – e uma expansão não planejada da pecuária e da agricultura.

Durante as décadas de 70 e 80 existia uma política de governo para promover o desenvolvimento da Amazônia com investimentos em infraestrutura e subsídios associados à concessão de crédito e incentivos fiscais afim de atrair capitais para a região e promover a expansão da agropecuária, o que contribuiu para acelerar o desmatamento.

Na **Tabela 1** a seguir, pode-se observar a expansão da área (em milhões de hectares) utilizada para atividade agropecuária na região em detrimento do recuo da área de floresta entre 1990 – 2019. A área de floresta reduziu de 375,18 milhões de

hectare para 336,35 milhões no período enquanto que a área utilizada para agropecuária aumentou de 21,35 milhões de hectare para 59,06 milhões.

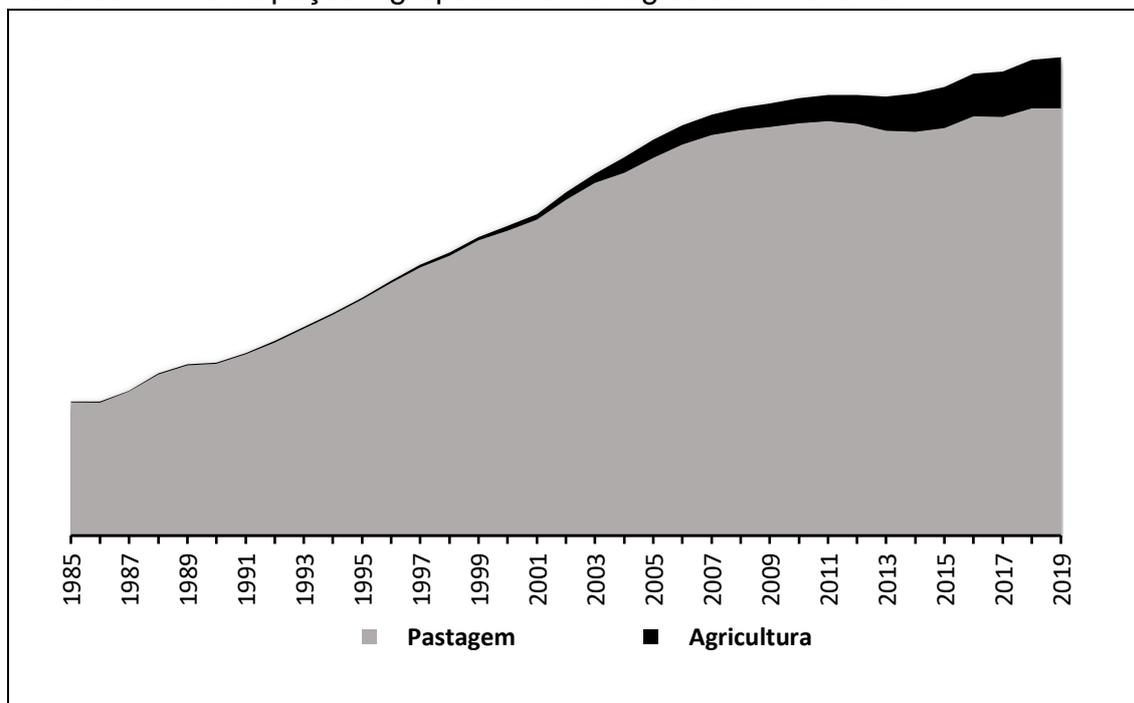
Tabela 1 - Evolução do uso da terra na Amazônia (em milhões de ha)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019	Var 90 – 2019 (%)
Floresta	375,18	367,14	357,74	347,23	342,47	340,11	336,35	-10,35
Agropecuária	21,35	29,38	38,22	48,89	53,99	55,40	59,06	176,65
Pastagem	21,20	29,15	37,61	46,62	50,93	50,32	52,78	149,00
Agricultura	0,15	0,23	0,61	2,27	3,06	5,09	6,28	4060,74

Fonte: MAPBIOMAS,2020.

Grande parte do desmatamento recente resulta da pecuária de grande e médio porte, o que pode ser observado abaixo, no **Gráfico 1**. Observa-se que a participação da Agricultura na região é muito inferior a área destinada a pastagem (apenas 10% do total da Agropecuária em 2019).

Gráfico 1 - Participação Agropecuária na região da Amazônia



Fonte: MAPBIOMAS,2020.

Porém, o uso de terra pela agricultura não é menor apenas na região da Amazônia Legal, sendo uma característica do Brasil como um todo, o que pode ser observado na **Tabela 2** abaixo.

Entre 1990 e 2000 a área com pastagens na Amazônia Legal passou de 21 para 38 milhões de hectares, crescimento de 77%, enquanto que no Brasil houve um

crescimento de apenas 19%. A área de agricultura apresentou valores pouco expressivos crescendo de 150 para 608 mil hectares.

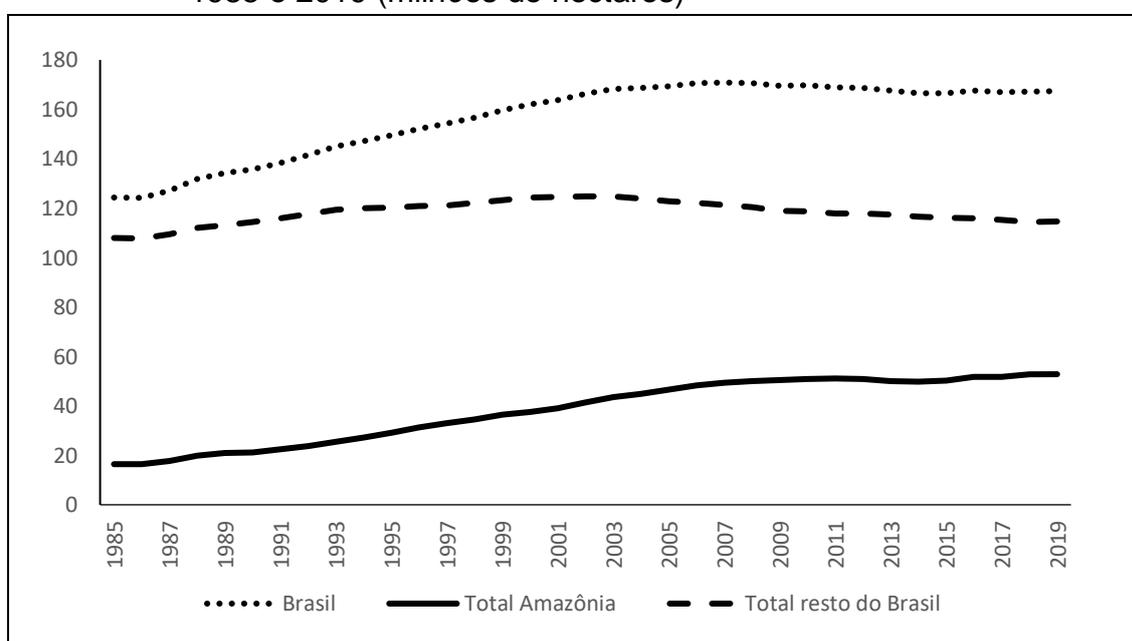
Tabela 2 - Área com agricultura e pastagens: Brasil e Amazônia Legal (em milhões de ha)

	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Brasil Agricultura	24,51	25,30	27,30	30,95	39,66	46,13	56,40	63,75
Brasil Pastagens	124,34	135,69	149,42	161,99	169,34	169,70	166,53	167,48
Amazônia Legal Agricultura	0,10	0,15	0,23	0,61	2,27	3,06	5,09	6,28
Amazônia Legal Pastagens	16,43	21,20	29,15	37,61	46,62	50,93	50,32	52,78

Fonte: MAPBIOMAS,2020.

Entre 2000 e 2010 a área de pastagens no Brasil ficou praticamente estável enquanto que na região da Amazônia Legal cresceu 35%. Já entre 2010 e 2019 houve uma redução de 2,23 milhões de hectares no Brasil, fenômeno que reflete na Amazônia Legal com grande desaceleração no crescimento da área com pastagens (crescimento de 3,6% apenas).

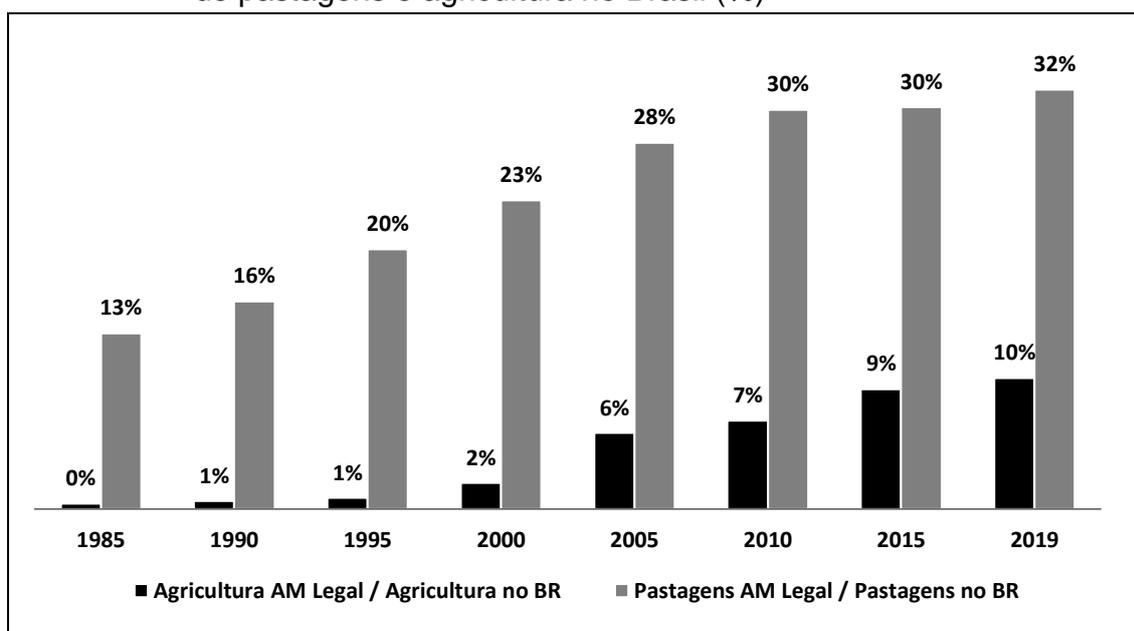
Gráfico 2 - Evolução da pastagem na Amazônia Legal e no restante do Brasil entre 1985 e 2019 (milhões de hectares)



Fonte: MAPBIOMAS,2020.

Com isto, conforme pode-se observar no **Gráfico 2** acima e no **Gráfico 3** a seguir, a Amazônia Legal foi a principal responsável pelo crescimento de pastagem nacional entre 1985 e 2005: a participação da área de pastagem da região na área de pastagem no Brasil aumentou 15 pontos percentuais, entre o período, passando de 13% para 28%, estabilizando-se em aproximadamente 30% nos anos seguintes. Já o comportamento da área de agricultura apresentou um crescimento mais acelerado entre 2000 e 2005, porém com valores pouco expressivos.

Gráfico 3 - Participação de pastagens e agricultura na AM Legal na área de pastagens e agricultura no Brasil (%)



Fonte: MAPBIOMAS,2020.

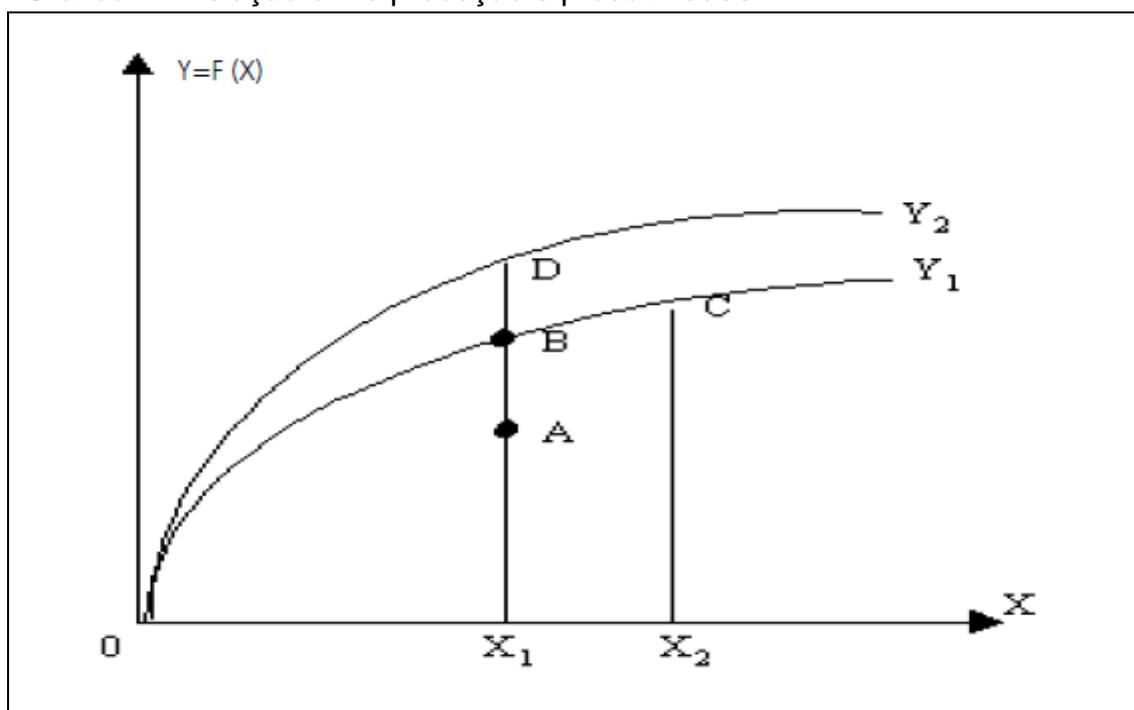
Como foi visto acima, pastagens representam a maior forma de uso da terra. Trata-se de uma pecuária (de corte e leite) de baixa produtividade. Segundo Homma (2010) seria possível reduzir a área de pastagens pela metade e manter o mesmo rebanho mediante o aumento da produtividade. Os Estados Unidos, com a metade do rebanho nacional, produzem mais do que o dobro de carne do Brasil. Segundo o último censo agropecuário (2017) realizado pelo IBGE, a produtividade dos pastos na Amazônia Legal é de 0,76 cabeça por hectare enquanto que no resto do Brasil chega a 0,91. A lotação média dos municípios da região é de 1,29 cabeças por hectare, enquanto que dos demais municípios é de 1,62. A média dos municípios do Brasil é de 1,57.

Quanto a agricultura, não é diferente: a produtividade da terra na produção de mandioca no Pará (maior produtor) foi de 13,6 t/ha em 2019, segundo a pesquisa de Produção Agrícola Municipal (PAM) realizada pelo IBGE, enquanto, no Paraná (segundo produtor), a produtividade foi de 23 t/ha. O Pará produz 3,7 milhões de toneladas em aproximadamente 270 mil hectares, o Paraná produz 3,2 milhões em apenas 138 mil. Outros cultivos como o milho e a soja apresentam produtividade da terra semelhantes à média do país: a produtividade da terra observada para o milho, em 2019, na região foi de 5,9 toneladas por hectare enquanto que no resto do Brasil foi de 5,6. Já a soja apresentou produtividade da terra de aproximadamente 3 toneladas por hectare em todas as regiões do país.

Essa baixa produtividade da terra pode ser justificada pelo menor preço e pela abundância de terra na região, assim como, segundo Vale (2012), nas regiões de fronteiras a elevada fertilidade natural do solo estimula o pecuarista a permanecer no sistema não intensivo.

O **Gráfico 4** abaixo representa uma função de produção e o que uma variação de produtividade pode representar. Simplificando: um único produto (Y) é produzido por um único insumo (X). Qualquer ponto ao longo da curva Y_1 indica o máximo de Y que pode ser obtido para um dado nível de X e, qualquer combinação (X, Y), abaixo da curva (ponto A), representa uma produção tecnicamente ineficiente visto que mais Y poderia ser produzido com a mesma quantidade de X.

Gráfico 4 - Relação entre produção e produtividade



Fonte: AHEARN ET AL.,1998.

A curvatura da função de produção representa a tecnologia de produção com retornos decrescentes de escala e mais unidades de Y podem ser obtidas para um dado nível de X através de inovação técnica. Mudança da tecnologia de produção está representada na figura como um deslocamento da superfície de produção de Y_1 para Y_2 , sendo assim, mais produto é produzido com a nova tecnologia representada por Y_2 utilizando a mesma quantidade de insumo. Por exemplo: com a mesma quantidade do insumo X_1 se produz mais quando a tecnologia de produção é representada por Y_2 (ponto D) do que quando é representada por Y_1 (ponto B) antes da nova tecnologia. Essa mudança tecnológica está geralmente ligada a melhoria da qualidade humana e do capital físico (AHEARN ET AL.,1998).

Ahearn et al. (1998) argumenta que os agricultores têm grande sensibilidade a mudanças nos preços relativos dos insumos o que faz com que eles se adaptem de forma a maximizar seus lucros. Além disso, as mudanças nos preços relativos também podem induzir as firmas privadas a desenvolver novas tecnologias aumentando a produtividade.

Outras fontes de crescimento da produtividade que têm sido identificadas na literatura são: **1)** Pesquisa e desenvolvimento; **2)** Extensão **3)** Educação; **4)** Infraestrutura e **5)** Programas de governo.

Porém, este trabalho busca investigar se a baixa produtividade da terra observada em alguns cultivos e principalmente na pecuária da região da Amazônia Legal pode ser justificada pela baixa eficiência e pelo aumento do desmatamento.

Avaliar a eficiência com a qual uma unidade produtiva opera pode contribuir para três fins principais: **1)** Fins estratégicos: possibilidade de comparação entre unidades produtivas; **2)** Fins de planejamento: avaliação dos resultados do uso de diferentes combinações de fatores e **3)** Melhor tomada de decisão por meio da análise da distância entre a produção atual e a possível (GOMES, SOARES DE MELLO e BIONDI NETO, 2003).

A eficiência de uma unidade produtiva, denominada de unidade tomadora de decisão ou DMU (*Decision Making Units*) pode ser calculada através de modelos não paramétricos, como o modelo de Análise de Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis – DEA*) ou o modelo FDH (*Free Disposal Hull - FDH*) e modelos paramétricos, como o modelo de Fronteira Estocástica (*Stochastic frontier analysis - SFA*) e o modelo de Mínimos Quadrados Ordinários Corrigidos (*Corrected Ordinary Least Square – COLS*).

O modelo DEA estima uma fronteira eficiente, através de combinações lineares entre planos de produção eficientes observados, que contém as unidades que apresentam as melhores práticas dentro da amostra. Essas unidades servem como referência ou *benchmark* para as unidades ineficientes.

Este modelo e o FDH (*Free Disposal Hull*) – que é similar ao anterior com a diferença de que não admite combinações lineares na comparação – são determinísticos porque identificam como ineficiência todo o desvio da fronteira sem estabelecer variáveis aleatórias e são não-paramétricos porque a mensuração da eficiência das DMUs é feita, considerando-se o desempenho das demais DMUs analisadas, com base em medidas de valores extremos observados, (NOGUEIRA,2005).

Por outro lado, SFA e COLS são métodos paramétricos os quais necessitam da especificação da forma funcional, tal como uma função Cobb-Douglas ou translog sendo que, a principal diferença entre SFA e COLS é que COLS atribui os desvios da fronteira à ineficiência, enquanto SFA permite que desvios da fronteira representem além de ineficiência um erro aleatório inevitável (ruído estatístico).

Na **tabela 3** a seguir são apresentadas as vantagens e desvantagens da técnica DEA diante das fronteiras paramétricas. A DEA é mais flexível que os

modelos de fronteira paramétrica, porque não precisa estabelecer uma tecnologia de parâmetros que determine, a priori, as relações entre insumos e produtos.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos modelos de eficiência

DEA		Fronteira Estocástica	
Vantagens		Desvantagens	
Não especifica a forma funcional	⇒	É necessário pré-fixar uma função de produção distribuição de variáveis aleatórias	
Contribui com informação importante para administração	⇒	Menos informações (sem folgas)	
Não é preciso ponderar <i>a priori</i> as variáveis do modelo multiproduto	⇒	Ponderações nos produtos (função fronteira)	
Um único resultado (ótimos de Pareto)	⇒	Possibilidade de ótimos locais	
Desvantagens		Vantagens	
Modelo determinístico	⇐	Divisão do desvio da fronteira: ineficiência ou erro aleatório	
Complicação em obter teste (análise de sensibilidade do modelo)	⇐	Teste de confiabilidade de ajuste aos modelos e de significância dos parâmetros	
Alta influência na fronteira de <i>outliers</i> (pertencentes aos grupos de comparação)	⇐	Menor sensibilidade a comportamentos extremos	

Fonte: POZO, 2002.

Nas seções que seguem os modelos de DEA e SFA, que foram utilizados neste trabalho, serão melhores detalhados. Porém, antes de qualificar eficiência, primeiro temos que definir o significado do termo.

2.1 Medidas de eficiência

A eficiência no sentido de Pareto (1906) é representada por uma situação hipotética onde ninguém pode alterar sua situação social por uma melhor situação sem que, com isso, provoque a mudança de outra pessoa para uma situação pior.

Koopmans (1951) ajusta o significado para um contexto de produção: a eficiência, segundo ele, ocorre quando uma unidade produtiva para aumentar qualquer *output* precisa reduzir pelo menos um *output* ou aumentar pelo menos um *input*. Também pode-se dizer que para a diminuição de qualquer *input*, é necessário aumentar pelo menos um *input*, ou reduzir pelo menos um *output*.

Com isso, Debreu (1951) utilizando a definição de Koopmans (1951) propõe uma forma de calcular a eficiência: ele utiliza uma relação de distâncias, que chamou de “coeficiente de utilização de recursos”. Dessa relação, seria quantificada a proporção em que uma situação obtida na economia se distancia da ótima, considerando-se essa como aquela que seria impossível aumentar a satisfação de algum indivíduo, sem ao menos diminuir a de outro.

Com o propósito de encontrar uma noção que fosse genérica e mensurável, através do uso de conceito de isoquanta e isocusto, Farrel (1957) propôs um modelo empírico de eficiência relativa, baseado em técnicas não-paramétricas, determinando a eficiência de uma unidade de produção, comparando-a com o melhor nível de eficiência até então observado. Desta forma, a comparação é feita entre as unidades, através dos reais valores dos múltiplos insumos e múltiplos produtos realmente utilizados, e não por valores estimados (FERREIRA,2002).

Farrell (1957) definiu o cálculo da eficiência em dois termos: a eficiência técnica e a eficiência alocativa (ou de preços). A primeira corresponde a minimização de desperdícios via minimização de inputs ou, alternativamente, a utilização do potencial produtivo, via maximização de outputs. A segunda obtém-se ao se utilizar uma combinação de insumos em proporções ótimas, dados os respectivos preços. A eficiência econômica (ou global) seria aquela que é eficiente dos pontos de vista técnico e alocativo, estabelecendo-as como iguais ao produto de ambas as medidas de eficiência (NOGUEIRA,2005).

O cálculo de eficiência técnica proposto pode ser executado sob duas óticas:
1) insumo orientada objetiva manter a mesma produção minimizando os insumos,

ou **2) produto orientada** com ênfase na maximização do produto, mantendo a mesma quantidade de insumos.

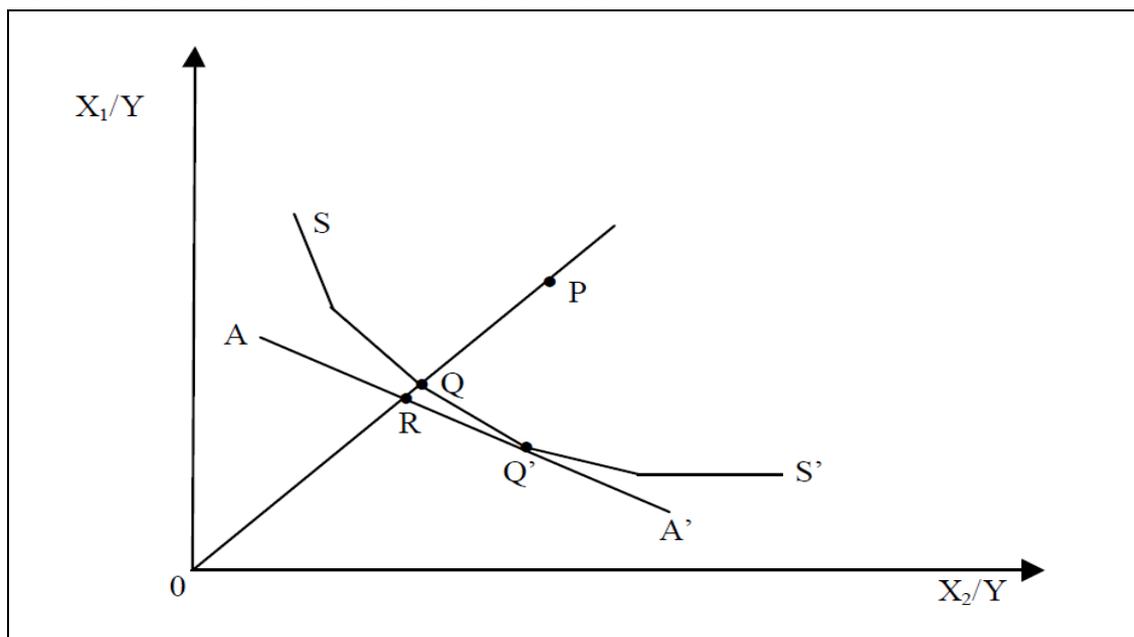
Em termos gerais, a orientação escolhida revela qual tipo de variável (insumo ou produto) o pesquisador gostaria de alterar enquanto mantém a outra constante e isso depende das características estruturais de cada unidade e do objetivo da análise.

No caso de uma análise de eficiência na agricultura, como ocorre no presente trabalho, parece razoável que se opte por uma orientação do tipo input pois deseja-se verificar se a produção justifica a quantidade de recursos empregados, se os recursos estão sendo empregados da melhor maneira possível, sem muitos desperdícios.

1) Eficiência insumo orientada

No **Gráfico 5** abaixo, os insumos são representados por (X_1 e X_2) e a produção por Y , onde a função de produção é dada por $Y = F(X_1, X_2)$. Pressupondo retornos constantes de escala, a fronteira tecnológica é representada pela isoquanta unitária SS' , quem estiver fora dela é ineficiente, no exemplo, representado, pela firma P . A ineficiência desta firma é representada pelo segmento QP , que indica o quanto os insumos podem ser reduzidos mantendo a mesma produção. A medida de eficiência técnica (ET) é dada pela razão entre as distâncias da origem até a isoquanta eficiente e da origem até a firma ineficiente, logo:

$$ET = \frac{OQ}{OP} = 1 - \frac{QP}{OP} \quad (1)$$

Gráfico 5 - Eficiência insumo orientada

Fonte: Gomes (1999) apud Ferreira (2002).

Como $0 < ET \leq 1$, a medida encontrada fornece o grau de ineficiência técnica da firma. Se $ET = 1$, a firma é tecnicamente eficiente e vai situar-se na isoquanta eficiente (SS'), como é o caso do ponto Q na figura acima.

Quando se conhece a razão entre o preço dos insumos, representada pela isocusto AA' , pode-se calcular a eficiência alocativa (EA). Considerando-se uma firma que opera em P, tem-se:

$$EA = \frac{OR}{OQ} \quad (2)$$

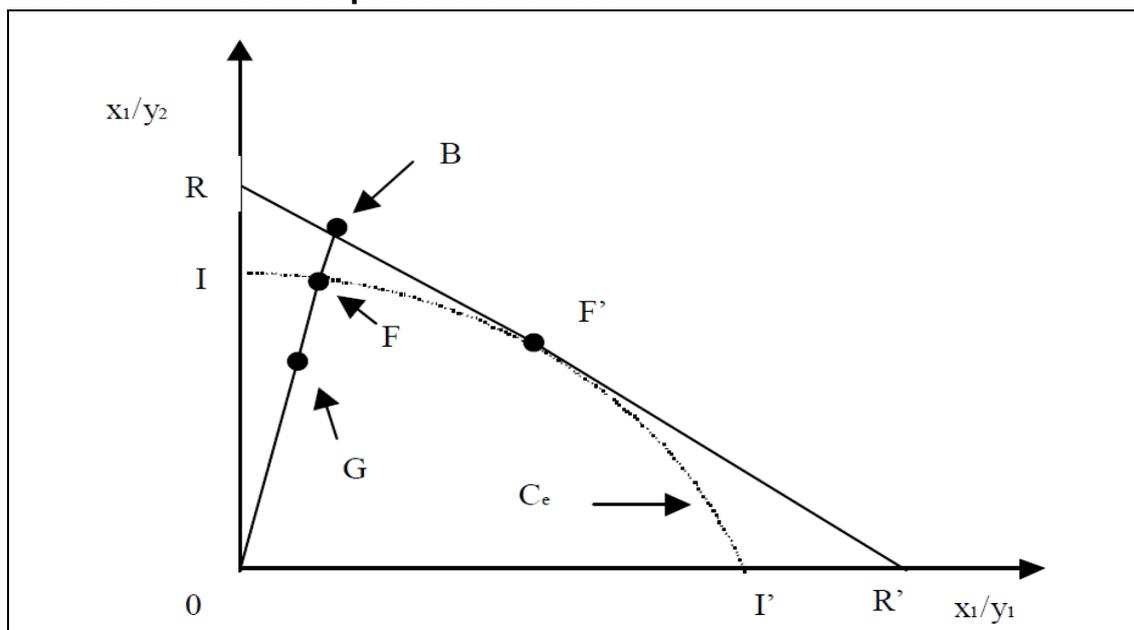
Sendo assim, a eficiência econômica total (EE) seria dada pelo produto das eficiências técnica e alocativa:

$$EE = ET \times EA = \frac{OQ}{OP} \times \frac{OR}{OQ} = \frac{OR}{OP} \quad (3)$$

2) Eficiência produto orientada

O **Gráfico 6** abaixo ilustra o cálculo da eficiência orientada ao produto, pressupondo retornos constantes de escala, em uma situação hipotética, onde são obtidos dois produtos y_1 e y_2 , mediante a utilização de apenas um insumo x_1 e a tecnologia representada pela curva de possibilidade de produção C_e .

Gráfico 6 - Eficiência produto orientada



Fonte: Gomes (1999) apud Ferreira (2002).

O ponto F está situado sobre a curva de possibilidade de produção, sendo, desta forma, considerado como eficiente tecnicamente (ET). O ponto G situa-se abaixo de F, logo ele é ineficiente. A distância FG representa o grau de ineficiência sendo assim calculado:

$$ET = \frac{OG}{OF} \quad (4)$$

Caso exista informações relativas aos preços dos produtos, uma linha de “isoreceita” (RR’) pode ser traçada e, então, obter a eficiência alocativa. A eficiência alocativa (EA) pode ser definida como:

$$EA = \frac{OF}{OB} \quad (5)$$

O cálculo da eficiência econômica total é semelhante ao realizado nas medidas de orientação insumo, isto é:

$$EE = \frac{OG}{OF} \times \frac{OF}{OB} = \frac{OG}{OB} \quad (6)$$

Esse modelo proposto por Farrel (1957) foi considerado por apenas alguns autores nas duas décadas seguintes. Boles (1966), Shephard (1970) e Afriat (1972)

sugeriram métodos de programação matemática para realizar o modelo. Porém, o método só foi receber mais atenção com o trabalho de Charnes, Cooper, Rhodes (1978), onde o termo *Data Envelopment Analysis* (DEA) foi utilizado pela primeira vez (COELLI et al., 1998).

2.2 Análise Envoltória de Dados (DEA)

O modelo DEA considera uma firma ou unidade de produção como *Decision Making Unit* (DMU) e é baseada em programação matemática, em modelos de programação linear, que visam estabelecer uma medida de eficiência relativa entre as unidades de produção ou firmas de um mesmo gênero, definindo e orientando metas para aquelas consideradas ineficientes.

Nesta abordagem, a análise de eficiência produtiva das unidades de produção com múltiplos insumos e múltiplos produtos parte da ideia de construir uma superfície limite, de tal modo que as empresas mais eficientes se situem sobre esta superfície (fronteira), enquanto as menos eficientes se situem internamente. Sobre esta superfície de referência, a relação produtos/insumos deve ser a maior possível dentre aquelas observadas nas várias empresas. Então o grau de ineficiência de uma DMU qualquer do conjunto pode ser avaliado como a distância do seu vetor insumo/produto até a superfície de referência. (PEREIRA, 1995).

Este método consiste em comparar uma unidade de produção ou DMU somente com a melhor unidade ou DMU.

Segundo Ferreira e Gomes (2009) a produtividade de cada DMU se relaciona a forma de utilização dos recursos para realizar a produção e, portanto, se expressa pelo quociente da produção (*output*) pelo recurso empregado (*input*).

Como a grande maioria das DMUs tem planos de produção que consideram múltiplos insumos e produtos, cada DMU avalia o seu nível de produtividade utilizando a melhor combinação entre inputs e outputs de tal forma que se consiga o máximo de produtividade. Ou seja, cada DMU busca maximizar

$$\frac{\text{Soma ponderada dos produtos (output virtual)}}{\text{Soma ponderada dos insumos (input virtual)}} = \frac{\sum_r u_r y_r}{\sum_i v_i x_i} \quad \text{ou, analogamente, minimizar}$$

$$\frac{\text{Soma ponderada dos insumos (input virtual)}}{\text{Soma ponderada dos produtos (output virtual)}} = \frac{\sum_i v_i x_i}{\sum_r u_r y_r}$$

Essa combinação, entretanto, deve ter a seguinte restrição: o output virtual deve ser menor ou igual que o input virtual. Isso significa que uma DMU é eficiente (output virtual = input virtual) sempre que for possível transformar todo o input virtual em output virtual sem que haja perdas durante o processo.

Por se tratar de um modelo de programação matemática, a DEA não avalia a natureza dos dados podendo combinar os *inputs* e *otputs* de maneira irrealista, sendo este, um dos problemas passíveis de ocorrer na metodologia.

Tendo apresentado o modelo geral da DEA, a seguir são apresentados dois modelos mais conhecidos de DEA que se distinguem devido aos seus pressupostos sobre a tecnologia.

2.2.1 Modelo Charnes, Copper e Rhodes (CCR)

O modelo CCR, publicado por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), trabalha com retornos constantes de escala, isto é, qualquer variação nos inputs produz variação proporcional nos outputs. A eficiência é determinada pela divisão entre a soma ponderada do output virtual e a soma ponderada do input virtual. Cada DMU pode escolher, da forma que lhe for mais conveniente, os pesos para cada variável (input ou output), desde que esses pesos aplicados às outras DMUs não gerem uma razão superior a 1. Tais condições podem ser observadas na **Equação 7** abaixo (GOMES, SOARES DE MELLO e BIONDI NETO, 2003).

$$\text{Max } Eff_0 = \frac{\sum_{j=1}^s u_j y_{j0}}{\sum_{i=1}^r v_i x_{i0}} \quad (7)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{j=1}^s u_j y_{jk}}{\sum_{i=1}^r v_i x_{ik}} \leq 1, k = 1, \dots, n$$

$$u_j \text{ e } v_i \geq 0 \forall j, i$$

Onde:

Eff_0 : Eficiência da DMU o em análise;

v_i : Pesos inputs;

- u_j : Pesos outputs;
- x_{ik} : Inputs i da DMU k;
- y_{jk} : Outputs j da DMU k;
- x_{io} : Inputs i da DMU o;
- y_{jo} : Output j da DMU o.

A maximização é resolvida para cada uma das DMUs, sendo transformada em um problema de programação linear igualando o denominador da função objetivo a uma constante igual a um. Esta formulação do modelo CCR, que recebe o nome de Modelo dos Multiplicadores (dual) é apresentada a seguir na **Equação 8** com orientação input.

$$Max\ Eff_o = \sum_{j=1}^s u_j y_{jo} \quad (8)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^r v_i x_{io} = 1$$

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^r v_i x_{ik} \leq 0, \quad k = 1, \dots, n$$

$$u_j \text{ e } v_i \geq 0 \quad \forall j, i$$

Onde:

Eff_o : Eficiência da DMU o em análise;

u_j : Pesos outputs;

y_{jo} Output j da DMU o;

v_i : Pesos inputs;

x_{io} : Inputs i da DMU o;

y_{jk} : Outputs j da DMU k;

x_{ik} : Inputs i da DMU k;

O modelo também pode ser apresentado através de sua forma primal como na **Equação 9** a seguir com orientação input. Nessa fórmula, para cada DMU escolhem-se os λ'_s que minimizam a distância h_o . No caso de $h_o = 1$, não é possível diminuir os insumos dado os produtos disponíveis e, portanto, a DMU é eficiente.

$$\text{Min } h_o \quad (9)$$

Sujeito a:

$$h_o x_{jo} - \sum_{k=1}^n \lambda_k x_{ik} \geq 0 \quad \forall i$$

$$-y_{jo} + \sum_{k=1}^m \lambda_k y_{jk} \geq 0 \quad \forall j$$

$$\lambda_k \geq 0 \quad \forall k$$

Onde:

h_o : Distância de contração dos inputs;

x_{jo} : Input j da DMU o;

λ_k : Pesos das combinações convexas das DMU's;

x_{ik} : Input i da DMU k;

y_{jo} : Output j da DMU o;

y_{jk} : Output j da DMU k.

2.2.2 Modelo Banker, Charnes e Cooper (BCC)

O modelo BCC, publicado por Banker, Charnes e Cooper (1984), considera retornos variáveis de escala, considerando o axioma da convexidade entre inputs e outputs.

O pressuposto da fronteira convexa no modelo BCC em detrimento do raio limitador apresentado no modelo CCR cria duas modificações na construção de sua fórmula:

- 1) No formato primal, acrescenta-se a restrição $\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$, que tem como função de identificar a existência de uma combinação convexa entre os λ'_s nesse modelo;
- 2) No formato dual, identifica-se a existência de um intercepto em seu hiperplano.

Sendo assim, o modelo primal com orientação para inputs pode ser observado na **Equação 10** abaixo.

$$\text{Min } h_o \quad (10)$$

Sujeito a:

$$h_o x_{io} - \sum_k x_{ik} \lambda_k \geq 0, \forall i$$

$$-y_{jo} + \sum_k y_{jk} \lambda_k \geq 0, \forall j$$

$$\sum_k \lambda_k = 1$$

$$\lambda_k \geq 0, \forall k$$

Onde:

$$h_o = 1/Eff_o$$

Eff_o : Eficiência da DMU o em análise;

x_{io} : Inputs i da DMU o;

x_{ik} : Inputs i da DMU k;

λ'_s : Pesos das combinações convexas das DMU's;

y_{jo} : Output j da DMU o;

y_{jk} : Outputs j da DMU k;

Já o formato dual linearizado com orientação para inputs é apresentado na **Equação 11** a seguir.

$$\text{Max } Eff_o = \sum_{j=1}^m v_j x_{io} + V_o \quad (11)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^m u_j y_{jo} = 1$$

$$- \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} + \sum_{j=1}^m u_j y_{jk} - V_o \leq 0 \forall k$$

$$v_i e u_j \geq 0 \forall i, j; V_o \in R$$

Onde:

v_i : Pesos inputs;

- x_{io} : Inputs i da DMU o;
- V_o : Intercepto do hiperplano;
- u_j : Pesos outputs;
- y_{jo} : Output j da DMU o;
- x_{ik} : Inputs i da DMU k;
- y_{jk} : Outputs j da DMU k.

Os escores de eficiência DEA são muito sensíveis a erros de medida nas DMUs que se encontram na fronteira, visto que uma perturbação nestes pode causar um forte impacto no parâmetro de eficiência dos demais. Com o objetivo de contornar esse problema, Simar e Wilson (1998) sugerem um método que consiste na realização de técnicas de amostragem: *bootstrap*, que permite corrigir as eficiências da DEA de vieses e estimar intervalos de confiança para elas.

2.2.3 Bootstrap

A técnica Bootstrap foi desenvolvida por Efron (1979), tratando-se de um método estatístico usado para calcular a precisão de medidas estimadas. A ideia básica do método é que na ausência de qualquer outra informação sobre determinada distribuição de uma estatística de interesse, podemos considerar que a própria amostra possui as melhores informações disponíveis sobre a distribuição desconhecida (CRUZ, 2016).

Sendo assim, o *bootstrap* consiste em fazer reamostragens, com reposição, de um conjunto de dados de modo a criar um novo conjunto de dados aleatório de mesmo tamanho. Posteriormente a partir desse novo conjunto de dados serão calculadas novas estatísticas, chamadas de réplicas. Esse procedimento é repetido diversas vezes de modo a criar uma amostra de réplicas e baseado nessa amostra, podemos descobrir mais sobre a desconhecida distribuição da estatística.

Assim seleciona-se, por exemplo, B reamostragens criadas via *bootstrap* (x^1, x^2, \dots, x^B) e calcula-se a estimativa de cada uma delas: ($t(x^b)$ onde $b = 1, \dots, B$).

Para verificar o desvio padrão da amostra, por exemplo, utilizam-se os desvios padrões observados em cada uma das reamostragens e calcula-se da seguinte forma:

$$\hat{s}_B = \sqrt{\frac{1}{B-1} \sum_{b=1}^B (t(x^b) - \bar{t})^2} \quad (12)$$

Onde: $\bar{t} = \sum_{b=1}^B t(x^b)$

O método de Análise Envoltória de Dados não considera a existência de aleatoriedades e erros de mensuração. Se uma DMU não se encontrar na fronteira de eficiência, necessariamente é por ineficiência.

Essa limitação da metodologia DEA se agrava devido a necessidade de que todas as DMUs sob análise devem utilizar os mesmos inputs e outputs.

Assim, é essencial que na coleta dos dados, todas as DMU utilizem os mesmos critérios, minimizando a possibilidade de aleatoriedades e erros de medidas. Essa adaptação e adequação da base de dados, entretanto pode ser um processo demorado.

A técnica de Bootstrap passa a ter aplicação interessante como mecanismo capaz de mitigar a sensibilidade da DEA em relação a base de dados, sendo capaz de calcular a variância dos scores, mesmo sob uma distribuição desconhecida. Com isso, é possível verificar se os scores encontrados pela DEA realmente refletem o nível de eficiência das DMUs.

Entretanto, o *bootstrap* normal não pode ser aplicado ao método DEA, porque não seria possível reamostrar diretamente o conjunto de escores, pois dessa maneira teríamos que admitir que os escores sejam independentes e identicamente distribuídos, o que iria contra a suposição que eles dependem da relação entre inputs e outputs. Também não poderíamos reamostrar simplesmente os inputs (ou outputs) para estimar a tecnologia e a eficiência de determinada DMU, pois poderíamos encontrar escores maiores do que a unidade, ou seja, vetores que não pertencem à tecnologia. Além disso, os escores do DEA também apresentam o problema de serem bastante concentrados em torno do valor unitário (CRUZ, 2016).

Simar e Wilson (1998) propuseram os métodos de alisamento da distribuição e de reflexão, conhecido como *Smoothed-Bootstrap*, bem como a correção do viés, para enfrentar estas dificuldades que impossibilitam o uso direto do *bootstrap*.

A amostra de Bootstrap original, ao ser criada, acaba possuindo muitos valores repetidos e, assim, muitos picos ao longo de sua distribuição. O *Smoothed-Bootstrap* é um mecanismo utilizado para suavizar essa distribuição da seguinte forma:

Em uma amostra (x_1, x_2, \dots, x_k) onde $r = 1, 2, \dots, k$:

1. Escolhe-se K amostras de maneira aleatória com reposição de $\{1, 2, \dots, k\}$;
2. Gera-se ϵ de uma distribuição normal padrão;
3. Calcula-se $Z_r = x_k + h \epsilon$ em que h é a largura de banda;

A amostra de *bootstrap* é agora (Z_1, Z_2, \dots, Z_k) , não uma amostra real da amostra original (x_1, x_2, \dots, x_k) , mas uma amostra suavizada. Dessa forma, suavizamos o número fixo de pontos para imitar uma função de distribuição contínua dos *inputs*. A distribuição para esses pontos suavizados é uma distribuição normal com variância h^2 e, portanto, é simétrica em torno dos pontos de observação.

Ao utilizar esta amostra suavizada para calcular a eficiência, pode haver ocorrências de muitos valores próximos da unidade. Isso ocorre devido à exigência da DEA de que a eficiência possua valores pertencentes ao intervalo $[0,1]$. Para resolver essa questão, utiliza-se o chamado método de reflexão, aumentando o conjunto de dados adicionando reflexos de todos os pontos no *bootstrap*, ou seja, sempre que temos eficiência E , aumentamos o conjunto de dados com a reflexão em $1, 2 - E$, de modo que E e $2 - E$ sejam simétricos em torno de 1. Em seguida, simplesmente usamos o valor abaixo ou igual a 1 (BOGETOFT E OTTO, 2011).

Para aplicar o método *Smoothed-Bootstrap* na DEA, primeiro estima-se a DEA na amostra original e obtêm-se os *scores* de eficiência estimados para cada uma das k DMUs (\hat{E}_k onde $k = 1, 2, \dots, k$). Em seguida, são realizadas B réplicas para obter os *escores* via Bootstrap. Os *escores* verificados nessa etapa precisam ser corrigidos pelo viés, alisados e refletidos (E_k^*).

Bogetoft e Otto (2011) sumarizaram o método da seguinte maneira:

1. Realiza-se amostras *bootstrap* \hat{E}_k para cada uma das DMUs, nomeadas por $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$;

2. Simula-se variáveis aleatórias independentes com padrão normal $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_k$;
3. Estabelece-se o alisamento e a reflexão através do cálculo abaixo:

$$\tilde{E}_k = \begin{cases} \beta_k + h\epsilon_k & \text{se } \beta_k + h\epsilon_k \leq 1 \\ 2 - \beta_k - h\epsilon_k & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (13)$$

4. Ajusta-se \tilde{E}_k para obter os parâmetros com a correta variância assintótica. Em seguida estima-se a variância:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^k (\hat{E}_k - \bar{\tilde{E}}_k)^2 \quad (14)$$

5. Sendo possível calcular:

$$E_k^* = \bar{\beta} + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h^2}{\hat{\sigma}^2}}} (\tilde{E}_k - \bar{\beta}) \quad (15)$$

Onde:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^k \beta_k$$

O processo *bootstrap* é repetido e obtêm-se para cada DMU_k, B pseudoamostras de interesse: $(x_k^b, y_k) = \left(\frac{\hat{E}_k^*}{E_k^*} x_k, y_k\right)$. Estas serão, então, aplicadas a DEA para permitir o cálculo dos estimadores $E_1^b, E_2^b, \dots, E_k^b$, onde $b = 1, 2, \dots, B$.

O método *Smoothed-Bootstrap-DEA* explicado acima será aplicado no presente trabalho.

2.2.4 Modelo de *bad output* ou direcional

Os modelos CCR e BCC já supracitados neste trabalho modelam os impactos ambientais indesejáveis ora como inputs a minimizar, ora como variáveis outputs a maximizar, usando as medidas radiais orientadas de Farrell (1957). Porém, essas abordagens tem uma importante limitação: não contemplam as possíveis projeções

não radiais que permitiram medir o desempenho ambiental de unidades produtivas em termos de capacidade de expansão da produção e de redução simultânea dos insumos e os produtos indesejados (VIEIRA, 2015).

Resultados indesejáveis são frequentemente produzidos em conjunto com resultados desejáveis, ou seja, um resultado bom não pode ser produzido sem produzir um resultado ruim. Essa produção conjunta de bons e maus resultados ganhou destaque na literatura sobre eficiência e produtividade, principalmente analisando eficiência ambiental, onde a produção de determinados bens gera poluentes no ar e resíduos perigosos.

Chung, Fare, Groaakopf (1997) encontraram a solução para esse problema ao incorporar no DEA as funções distância direcionais (DDF).

Descreveram a tecnologia de forma geral como demonstrado na **Equação 16** que segue:

$$P(x) = \{(y, b): x \text{ pode produzir } (y, b)\} \quad (16)$$

Onde:

$$\begin{aligned} x \in \mathbb{R}_+^N &: \text{ Inputs;} \\ y \in \mathbb{R}_+^M &: \text{ Bons outputs;} \\ b \in \mathbb{R}_+^I &: \text{ Maus outputs.} \end{aligned}$$

Pressupõem-se que os bons e maus *outputs* são produzidos em conjunto, isto pode ser representado por:

$$\text{Se } (y, b) \in P(x) \text{ e } b = 0 \text{ então } y = 0 \quad (17)$$

A fim de reduzir saídas ruins (*bad outputs*) é utilizada uma função de distância direcional que procura aumentar os bons outputs e ao mesmo tempo, diminuir os outputs ruins. A função distância direcional pode ser definida como:

$$\vec{D}_o(x, y, b; g) = \{\beta: (y, b) + \beta g \in P(x)\} \quad (18)$$

onde “g” representa o vetor de direções, nas quais as saídas são escalonadas. Para este trabalho, $g = (y, -b)$, significando que bons outputs são maximizados e maus outputs minimizados.

A partir disso, pode-se expor o problema de maximização linear que se objetiva encontrar os resultados de eficiência

$$MAX \theta = (\vec{D}_o(x, y, b; g))^{-1} \quad (19)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^k z_k y_{km} \geq \theta y_{km}, m = 1, \dots, M$$

$$\sum_{k=1}^k z_k b_{ki} = \theta b_{ki}, i = 1, \dots, I$$

$$\sum_{k=1}^k z_k x_{kn} \leq x_{kn}, n = 1, \dots, N$$

$$z_k \geq 0, k = 1, \dots, N$$

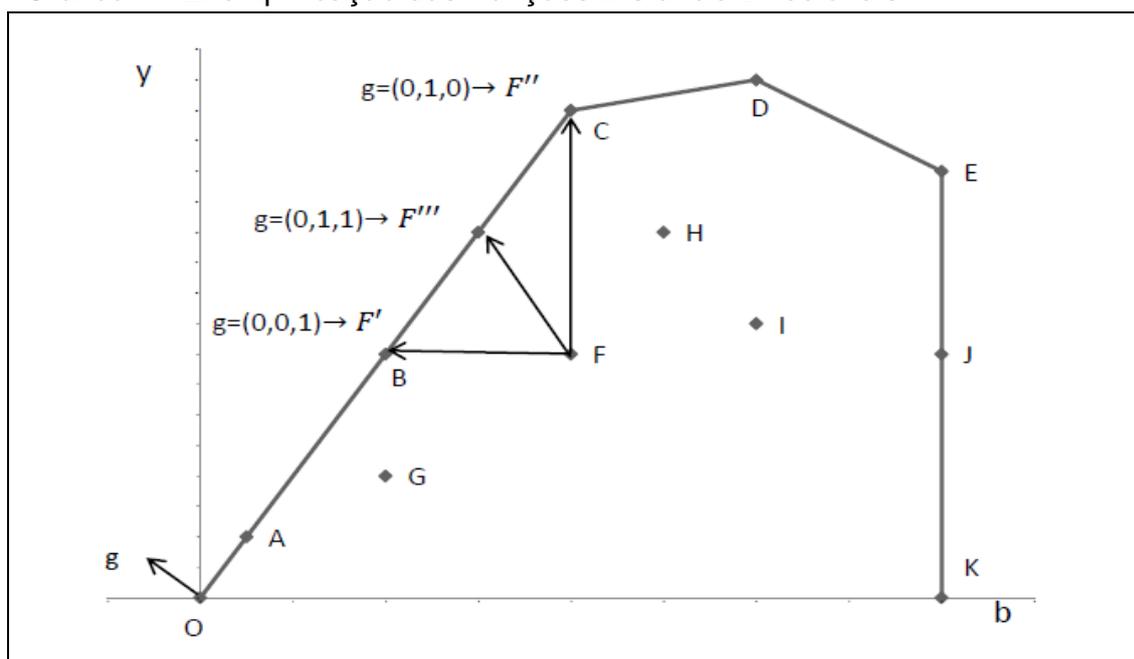
Sendo:

- k : Número de observações;
- m : Número de *outputs* bons;
- n : Número de *outputs* maus;
- i : Número de inputs;
- z : Variável de intensidade.

Sendo θ o valor a ser estimado e indicará o percentual em que a DMU avaliada poderia incrementar todos os produtos desejáveis e reduzir simultaneamente os insumos e externalidades negativas definida pelo pesquisador através do vetor direção “g”. Se $\theta = 0$ significa que a unidade avaliada é eficiente, se $\theta > 0$ é ineficiente.

O significado do conceito de θ pode ser representado graficamente. Suponha-se que as DMU's avaliadas (A, B, C, D, E, F,... e K), utilizando uma determinada quantidade de insumos, produzem um *output* desejável e um *output* indesejável. Dessa forma, no **Gráfico 7**, a área $OABCDEJK$ representa o conjunto de possibilidade de produção cuja fronteira eficiente é formada pelo segmento \overline{OABCD} .

Gráfico 7 - Exemplificação das Funções Distância Direcionais



Fonte: Vieira (2015).

Assim, os pontos F, E, G, H, I, J e K representam DMU's ineficientes pois estão abaixo da fronteira eficiente. Pegando como exemplo a DMU F, seu nível de ineficiência e projeção para a fronteira depende do vetor direção definido *a priori*.

Por exemplo, desejando saber em quanto pode ser acrescentado o *output* desejado de F com o mesmo nível de impacto ambiental e insumos, ou seja, determinando $g = (-g_x = 0, g_y = 1, -g_b = 0)$, o problema de programação linear (PPL) projetará F no ponto $F'' = [b^F, y^F, (1 + \theta g_y)]$.

No entanto, desejando reduzir o impacto ambiental mantendo o produto desejado e os insumos constantes, usando o vetor direção $g = (-g_x = 0, g_y = 0, -g_b = 1)$, o PPL projetará F no ponto $F' = [b^F(1 - \theta g_b), y^F(1 + \theta g_y)]$.

Por fim, se o objetivo for aumentar *y* e reduzir *b* simultaneamente com os mesmos insumos, utilizando $g = (-g_x = 0, g_y = 1, -g_b = 1)$, o PPL projetará F no ponto $F''' = [b^F(1 - \theta g_b), y^F(1 + \theta g_y)]$.

Portanto, observa-se que, satisfazendo o conceito de ótimo de Pareto, é possível aumentar de diferentes formas a eficiência (VIEIRA, 2015).

2.2.5 Modelo DEA na agropecuária

Na literatura são encontradas inúmeras referências ao uso de DEA para a análise de eficiência em agricultura, Gomes (2008) realizou uma extensa revisão de literatura e encontrou 158 referências em periódicos internacionais e nacionais: Townsend, Kirsten e Vink (1998) testaram, com uso de DEA, a relação inversa entre tamanho da propriedade e produtividade o que nem sempre se mostrou verdadeiro. Gulati e Mishra (1999) avaliaram a eficiência e os retornos de escala de fazendas de algodão nos Estados Unidos. Um outro estudo sobre fazendas de algodão, neste caso no Paquistão, pode ser encontrado em Shafiq e Rehman (2000).

No Brasil também foram encontrados alguns estudos sobre DEA em agricultura: Sturion (1996) utilizou DEA em unidades de produção da agropecuária catarinense e fez uma análise sobre o papel da Extensão Rural frente às unidades de produção ineficientes e de como utilizar os resultados da análise de DEA para torná-las eficientes. Toresan (1998) examinou o problema da compatibilidade de curto prazo entre as práticas agrícolas de manejo sustentável do solo e a eficiência técnica na produção, avaliando propriedades agrícolas de Santa Catarina. Pereira (1999) e Pereira e Silveira (2001), utilizaram índice de Malmquist e DEA para estudarem a evolução tecnológica e o crescimento da produtividade total dos fatores do setor agropecuário brasileiro, nos períodos de 1970-1996 e 1985-1996, respectivamente considerando como unidades da análise os Estados, as Regiões e o Brasil. A eficiência técnica e a produtividade de um conjunto de unidades de produção leiteira do Estado do Paraná foram avaliadas por Souza e Wilhelm (2001). Pereira Filho (2000) analisou a eficiência por DEA da pequena produção familiar agrícola na região do Recôncavo do Estado da Bahia além de muitos outros trabalhos¹ (GOMES, SOARES DE MELLO e BIONDI NETO, 2003).

Almeida (2012) também realizou uma extensa revisão de literatura sobre o assunto e encontrou 44 artigos que analisaram eficiência na agropecuária em outros países que não o Brasil, dentre eles alguns utilizando o modelo DEA tais como: Iráizoz, Rapún e Zabaleta (2003); Sherlund, Barrett e Adesina (2002) e Sharma, Leung e Zaleski (1999) entre outros. Já no Brasil ele encontrou 24 trabalhos sendo

¹ Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/657598/uso-de-modelos-dea-em-agricultura-revisao-da-literatura>>. Acesso em: 31/10/2020.

que os que utilizam o modelo DEA são: Gomes (1999); Silva (2001); Silva (2002); Silva e Sampaio (2002); Souza (2003); Vicente (2004); Santos, Vieira e Baptista (2004); Gomes, Mangabeira e Soares de Mello (2005); Magalhães e Campos (2006); Campos e Ferreira Neto (2008); Gonçalves et al. (2008); Constantin, Martin e Rivera (2009); Mariano e Pinheiro (2009).

Vieira (2015) encontrou mais alguns trabalhos que utilizam DEA para medir agropecuária no Brasil: Gomes et al. (2009); Macedo, Cípola e Ferreira (2010); Campos, Coelho e Gomes (2012); Padrão et al (2012); Lopes (2014); Rosano-Peña et al. (2014); Rosano-Peña e Daher (2015).

Em uma revisão complementar foram encontrados ainda outros estudos. Ferreira (2002) utilizou DEA para avaliar a eficiência técnica dos fatores de produção e dos insumos em sistemas de produção de leite de gado holandês, mestiço e zebu. Roberts (2003) mediu a eficiência dos 112 produtores de leite no estado de Rondônia. Nogueira (2005) mediu a eficiência técnica na agropecuária das microrregiões brasileiras. Pachiel (2009) utilizou o modelo para medir a eficiência produtiva de usinas de cana de açúcar no estado de São Paulo. Oliveira (2013) investigou a relação entre produtividade e tamanho do estabelecimento agropecuário utilizando de escores de eficiência produtiva e Vieira (2015) que mediu a eficiência na agropecuária de todos os 246 municípios do Estado de Goiás.

As variáveis utilizadas no presente trabalho são, em geral, coincidentes com as variáveis utilizadas nos artigos citados neste item. Os trabalhos utilizaram a quantidade produzida ou o valor da produção como *output*. As variáveis utilizadas como *inputs* foram, em suma, terra (área cultivada), trabalho (normalmente medido em salário ou número de trabalhadores), capital (medido por número de tratores, fluxo de serviços, instalações ou despesas com maquinaria), insumos (despesas com fertilizantes, agrotóxicos, rações, medicamentos, entre outros).

Outra abordagem para a avaliação de eficiência utilizada por uma parte da literatura e já comentada anteriormente neste trabalho, é a abordagem de fronteira estocástica (SFA), que será detalhada no próximo tópico.

2.3 Fronteira Estocástica (SFA)

O modelo de Fronteira Estocástica, desenvolvido, de modo simultâneo, por Aigner, Lovell e Schmidt (1977), Battese e Corra (1977) e Meeusen e Vanden Broeck (1977), utiliza uma abordagem paramétrica e, diferente do modelo de DEA, pressupõe, a priori, uma estrutura da fronteira de possibilidades de produção e o processo de geração de dados. Com isso, permite assumir uma relação estocástica entre os inputs e outputs e que desvios da fronteira podem refletir não apenas ineficiências, mas também erros aleatórios. (BOGETOFT e OTTO, 2011)

Coelli et al. (1998) definem a função de produção de uma unidade de produção i no período t como apresentado na **Equação 20**.

$$y_i = \exp(x_i\beta + v_i - u_i) \quad (20)$$

Podendo ser escrita também das seguintes formas:

$$y_i = \exp(x_i\beta + v_i) \exp(-u_i) \quad (21)$$

$$\ln y_i = x_i\beta + v_i - u_i$$

Onde:

y_i : vetor de quantidades produzidas (outputs);

x_i : vetor de insumos (inputs) utilizados na produção;

β_i : vetor de coeficientes a serem estimados (parâmetros);

v_i : erro aleatório;

u_i : ineficiência técnica.

v_i é o termo aleatório usual com sinal livre (podendo aumentar ou diminuir o produto) e distribuição normal e u_i é um termo não negativo que mensura a ineficiência da produção com distribuição: half-normal, normal truncada ou exponencial.

Dessa forma, podemos entender que v_{it} representa as variáveis que não estão no controle da DMU e u_i representa a distância que a DMU está da fronteira, e, portanto, significa a ineficiência. Assume-se que os termos v_{it} e u_{it} são

independentes. Se $u = 0$ a DMU é 100% eficiente, e se, $u > 0$, então existe alguma ineficiência.

Segundo Bogetoft e Otto (2011), para estimar os modelos SFA, ou seja, determinar os valores dos parâmetros desconhecidos β , σ_v^2 e σ_u^2 utiliza-se o princípio da máxima verossimilhança. Assim, estimamos os valores dos parâmetros como os valores que tornam as observações as mais prováveis possíveis. Para fazer isso, no entanto, devemos saber a densidade do termo de erro combinado.

$$\epsilon = v - u \quad (22)$$

A distribuição do termo de erro ϵ não é uma distribuição simples, mas sim uma convolução de uma distribuição normal, v , e uma distribuição normal truncada, u .

Além disso, embora a função estimada possa ser de interesse por si só, geralmente estamos mais interessados nas estimativas resultantes das eficiências individuais. Ou seja, gostaríamos de estimar u_i , $i = 1, \dots, I$. Uma questão importante é, portanto, como estimá-los. Quando estimamos o modelo para encontrar β , σ_v^2 e σ_u^2 , podemos calcular facilmente os termos de erro total: $\epsilon_i = v_i - u_i = y_i - f(x_i; \hat{\beta})$, mas não podemos obter diretamente seus componentes v_i e u_i .

Considere o termo de erro combinado: $\epsilon = v - u$, onde $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ e $u \sim N_+(0, \sigma_u^2)$;

Se v domina u , ou seja, a variância de v , σ_v^2 , é muito maior do que a variância de u , σ_u^2 , então, a distribuição de ϵ parece uma distribuição normal ordinária, na verdade, parece com a distribuição de v . Se, por outro lado, u dominar v , então a distribuição de ϵ vai parecer com a distribuição de u , ou seja, uma distribuição normal truncada.

Parametrizando:

$$\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2 \text{ e } \lambda = \sqrt{\frac{\sigma_u^2}{\sigma_v^2}} \quad (23)$$

Quando $\sigma_u^2 = 0$, e portanto $\lambda = 0$, temos o caso de regressão comum. Quando a variância para o termo de ineficiência u é positiva, ela segue uma distribuição

seminormal na parte positiva. Já se a variância do termo de ineficiência for muito pequena, ou seja, próxima de 0, a densidade do termo de ineficiência u é muito estreito. Em tais casos, é difícil distinguir entre o termo de erro total ϵ e o termo de erro normal v .

Quando a variância do termo de ineficiência está ficando maior em relação à variância do termo de erro normal, ou seja, λ fica maior, a densidade do termo de erro total é mais ampla e inclinada para a parte negativa. Se λ for grande, u está dominando e quase todo o termo de erro se deve a diferenças de eficiência.

Quando olhamos para os termos de erro combinados, podemos dizer que uma distribuição mais enviesada indica um maior grau em que o termo de eficiência domina o termo de erro normal. Isso explica como podemos realmente estimar os dois termos de erro, embora eles pareçam não estar identificados na **Equação 21** acima.

Para estimar λ e as σ^2 poderíamos, portanto, estimar o modelo como um modelo de regressão comum, calcular os resíduos e traçar suas densidades. Poderíamos então, comparar os gráficos de densidades do modelo com os gráficos das formas da função de verossimilhança que respeitam as distribuições dos erros, ou seja: $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ e $u \sim N_+(0, \sigma_u^2)$, e escolher os valores de σ^2 e λ que se parecem mais com os gráficos.

Porém, este é um método bastante subjetivo para estimar os parâmetros; é também um método incerto e lento. Em vez disso, usa-se um computador para fazer as comparações e escolher o valor de λ e σ^2 (e β) que faz a curva de densidade se parecer mais com a curva de densidade empírica dos termos de erro combinados estimados. Isso pode ser feito pelo método de estimativa de máxima verossimilhança.

Sendo assim, pode-se calcular os parâmetros β , σ^2 e λ do modelo SFA básico representado pela **Equação 21** usando o método de máxima verossimilhança, maximizando a função de log-verossimilhança com relação aos parâmetros β , σ^2 e λ . Isso pode ser feito automaticamente utilizando a função *sfa* do pacote R Benchmarking (BOGETOFT e OTTO, 2011).

2.3.1 Modelo SFA na agropecuária

A revisão de literatura feita por Gomes (2008) também encontrou trabalhos que utilizaram o modelo SFA para medir eficiência. Alguns deles são: Souza, Ávila e Alves (1999), Silva e Sampaio (2002), Homem de Souza e Alves (2003) e Baptista, Castro e Teixeiras (2004).

Almeida (2012) além de investigar se existem diferenças na eficiência técnica entre o pequeno, o médio e o grande estabelecimento agropecuário no Brasil utilizando a SFA, também realizou uma extensa revisão de literatura onde encontrou diversos trabalhos que utilizaram do mesmo modelo em outros países que não o Brasil: Hadley (2006), Ajibefun, Daramola e Falusi (2006), Bozoglu e Ceyhan (2007), Boshraadi, Villano e Fleming (2008), Nehring et al. (2009), Dey et al. (2010). Já no Brasil os trabalhos que fizeram uso do método foram: Pereira Filho (2000), Pereira et al. (2001), Silva e Ferreira Jr. (2002), Leão, Ribeiro e Lima (2002), Richetti e Reis (2003), Zilli (2003), Barros, Costa e Sampaio (2004).

Outros estudos encontrados que medem a eficiência na agropecuária brasileira através do modelo de SFA foram: Homem de Souza (2003) testou os métodos de DEA, SFA e procedimento de Varian na análise de eficiência da produção de leite; Baptista, Castro e Teixeiras (2004) utilizaram DEA e SFA para analisar a função de produção agregada da agropecuária do estado de Minas Gerais; Souza (2006) avaliou efeitos técnicos que potencialmente afetam a fronteira de produção dos centros de pesquisa da Embrapa; Souza, Gomes e Gazzola (2010) avaliou a eficiência técnica de produção agrícola de 27 estados brasileiros; Nascimento et al. (2012) utilizaram a metodologia de fronteira estocástica para analisar a eficiência técnica da pecuária de leite no estado de Minas Gerais; Marchand (2012) analisou o impacto da eficiência técnica agrícola na propensão dos agricultores de desmatar; Morais et al. (2016) analisaram a Produtividade Total dos Fatores (FTP) e a evolução da eficiência técnica dos produtos agrícolas para os países da América do Sul no período entre 1991 e 2010; Brito (2016) analisou a eficiência técnica da pecuária leiteira com base nos dados do Censo Agropecuário de 2006; Martins (2019) mensurou a eficiência técnica dos produtores de gado de corte de regiões brasileiras selecionadas e Ferreira e Féres (2020) investigaram a

relação entre o tamanho da propriedade e a eficiência do uso da terra na Amazônia brasileira com base nos dados do Censo Agropecuário de 2006.

Na próxima seção é especificado os modelos utilizados no presente trabalho detalhando os *inputs* e *outputs* e quais modelos supracitados utilizados.

3. METODOLOGIA

3.1 Especificação dos Modelos

Com o objetivo de medir a eficiência da agropecuária na região da Amazônia Legal assim como comparar o desempenho da região com a agropecuária do Brasil foi escolhido os municípios como DMUs, em razão da disponibilidade dos dados, visto que não era possível uma pesquisa com cada agricultor.

O ano de análise é 2006, escolhido em razão da disponibilidade dos dados oriundos do censo agropecuário realizado pelo IBGE, que devido corte de orçamento, não disponibilizou as variáveis necessárias para este trabalho no último censo de 2017, portanto, trata-se de uma amostra do tipo *cross-section*.

Utiliza-se o programa R-Studio do R Core Team (2020), com o pacote BENCHMARKING de Bogetoft e Otto (2015), o pacote DeaR de Coll-Serrano, Bolos e Suarez (2020), que permite utilizar a abordagem metodológica de *bad output* já discutida anteriormente e o pacote FRONTIER de Coelli e Henningse (2020) para o modelo de fronteira estocástica.

Foram utilizados como inputs: área colhida de lavoura, área de pastagem (hectare), mão de obra (número de pessoal ocupado) e despesas com adubos, corretivos do solo, sementes e mudas, sacarias e embalagens, agrotóxicos, medicamentos para animais, sal e rações (industrializados ou não industrializados), transporte da produção, energia elétrica e combustíveis (aproximação para indicar despesas ocorridas através do uso de máquinas e equipamentos). Já como *output* foi utilizado o valor da produção do estabelecimento agropecuário no ano e como *output* indesejável foi utilizado o desmatamento (incremento 2005/2006) coletado no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Estes inputs e outputs foram escolhidos com base no que vem sendo utilizado na literatura como mencionado por este trabalho no **item 3.2.5** e na disponibilidade dos dados.

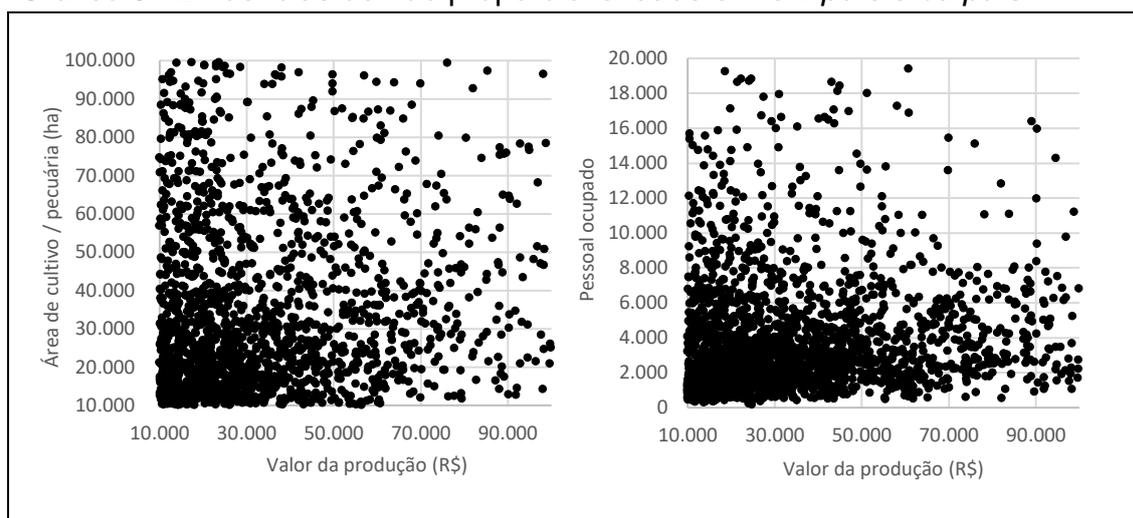
Na **Tabela 4** a seguir é apresentado um resumo dos dados supracitados, bem como suas fontes e o ano utilizado pelo trabalho.

Tabela 4 - Variáveis utilizadas como inputs e outputs

Inputs		
Dados	Fonte	Ano
Área de lavouras (ha)	IBGE	2006
Área de pastagem (ha)		
Aubos (mil/R\$)		
Corretivos do solo (mil/R\$)		
Sementes e mudas (mil/R\$)		
Sacarias e embalagens (mil/R\$)		
Agrotóxicos (mil/R\$)		
Medicamentos para animais (mil/R\$)		
Sal e rações (mil/R\$)		
Transporte (mil/R\$)		
Energia elétrica (mil/R\$)		
Combustíveis (mil/R\$)		
Pessoal ocupado (pessoas)		
Outputs		
Dados	Fonte	Ano
Produção (mil/R\$)	IBGE	2006
Desmatamento	INPE	

Fonte: O autor, 2020.

Quanto à escolha do modelo DEA, no presente trabalho foi usado o modelo DEA BCC, já que não há evidências de proporcionalidade entre *inputs* e *outputs*. Uma vez que o modelo CCR em sua forma fracionária apresenta uma função homogênea de grau zero, seria necessária esta proporcionalidade para justificar o seu uso. Para comprovar a não existência de proporcionalidade, basta observar o **Gráfico 8** a seguir. Nela fica evidente que, não há indícios de proporcionalidade entre a área utilizada para produção e o valor da produção e nem entre mão de obra e valor da produção para os municípios do Brasil.

Gráfico 8 - Evidências de não proporcionalidade entre *inputs* e *outputs*

Fonte: O autor, 2020.

Foram realizados 5 modelos explicitados a seguir:

No **modelo 1** foi calculada a eficiência dos municípios da região da Amazônia Legal através do modelo DEA / BCC com orientação *input*. Após a retirada dos municípios com dados faltantes foram efetivamente utilizados os dados de 437 municípios (o que representa 79% do valor da produção total da região).

Já o **modelo 2** acrescenta ao modelo 1 a variável de desmatamento dos municípios como um output indesejado e retira-se do modelo 71 municípios que não apresentavam floresta em seu território segundo dados do INPE, ou seja, tais municípios não seriam capazes de produzir desmatamento. Esses municípios eram responsáveis por 8% da produção da região.

No **modelo 3** foi medida a eficiência de todos os municípios do Brasil, através do modelo DEA / BCC com orientação *input* utilizando *bootstrap* com 2000 réplicas. Foram utilizados os dados de 3.520 municípios de todas as regiões do Brasil após a retirada de municípios com dados faltantes que representavam apenas 18% do valor total da produção. Esse cenário tem por objetivo comparar as eficiências dos municípios de todas as regiões do Brasil dando enfoque aos municípios da Amazônia Legal.

No **modelo 4** foi testada a unicidade da fronteira de eficiência proposta por Charnes, Cooper e Rhodes (1981), Gstach (1995) e por Brouckett e Golany (1996). Tal procedimento verifica se a amostra analisada é homogênea, passível a testes de comparabilidade, se existem duas fronteiras de eficiência distintas, ou se, na

realidade, a existência de unidades ineficientes se deve a problemas de administração ou problemas estruturais.

Os testes foram feitos seguindo os passos listados por Marinho e Façanha (2000) abaixo:

- 1) A amostra composta por 3520 municípios foi dividida em duas subamostras: 437 municípios da região da Amazônia Legal e 3083 municípios das demais regiões. Feito isso, foram calculadas duas novas fronteiras de eficiência para cada subamostra gerando os valores ótimos (*targets*) de todos os inputs.
- 2) As unidades de cada fronteira foram ajustadas com seus respectivos valores ótimos, substituindo os valores observados das variáveis dos municípios ineficientes pelos *targets* indicados.
- 3) Foi calculada uma nova fronteira com a união das duas subamostras ajustadas.
- 4) Dividiu-se novamente a amostra como mencionado no item 1 (municípios da Amazônia Legal e não Amazônia Legal) e foi realizado teste não paramétrico, de Mann-Whitney, para testar a hipótese nula de que ambas as amostras sejam estatisticamente iguais. Esse teste foi utilizado por Brockett e Golany (1996) — programas do setor educação nos Estados Unidos — por Prior (1996) — hospitais gerais na Espanha — e por Marinho e Façanha (2000) — hospitais universitários federais brasileiros — e é válido para amostras independentes.

No **modelo 5** a eficiência dos municípios foi medida através do modelo de Fronteira Estocástica (SFA) utilizando como forma funcional a função de produção *translog* por ser mais flexível (não impõe restrições a priori).

Assim como no trabalho de Baptista, Castro e Teixeiras (2004), pressupõe-se a separabilidade fraca entre os fatores de produção de tal forma que eles foram agregados em três grupos X_1 , X_2 e X_3 . Sendo **X_1) Terra:** área de lavoura e área de pastagem em hectare; **X_2) Capital:** adubos, corretivos do solo, sementes e mudas, sacarias e embalagens, agrotóxicos, medicamentos para animais, sal e rações, transporte, energia elétrica, combustíveis e **X_3) Trabalho:** pessoal ocupado nas atividades agropecuárias.

Logo, a função de produção utilizada pode ser observada na **Equação 24** a seguir.

$$\ln Y_i = \ln \alpha_0 + \sum_{j=1}^3 \alpha_j \ln X_{ji} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \beta_{jk} \ln X_{ji} \ln X_{ki} + \mu_i \quad (24)$$

Onde:

i : Número de DMUs;

X_{jk} : Fatores de produção; $j, k = 1, 2, 3$

Y : Variável dependente (produção);

μ_i : Erro aleatório pressuposto normal, independente e de variância constante.

A **Tabela 5** exibe algumas estatísticas descritivas acerca das variáveis utilizadas nos modelos 1 e 2 que utilizam os 437 municípios da Amazônia Legal como DMUs, já a **Tabela 6** apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas nos demais modelos que utilizam como DMUs 3.520 municípios do Brasil.

Tabela 5 - Estatísticas descritivas dos inputs e outputs selecionados (modelos 1 e 2)

Variáveis		Média	Mediana	Mínimo	Máximo
Inputs	Área de lavouras (ha)	21.265	7.903	138	500.981
	Área de pastagem (ha)	94.483	57.312	33	914.666
	Aubos (mil/R\$)	7.913	225	1	545.459
	Corretivos do solo (mil/R\$)	1.480	89	1	269.452
	Sementes e mudas (mil/R\$)	943	103	1	206.347
	Sacarias e embalagens (mil/R\$)	48	17	1	1.279
	Agrotóxicos (mil/R\$)	5.457	172	1	755.485
	Medicamentos para animais (mil/R\$)	3.029	448	9	856.436
	Sal e rações (mil/R\$)	1.504	686	3	24.250
	Transporte (mil/R\$)	544	66	1	53.378
	Energia elétrica (mil/R\$)	742	343	3	27.841
	Combustíveis (mil/R\$)	1.941	937	4	34.695
	Pessoal ocupado (pessoas)	4.410	3.209	126	39.883
Outputs	Produção (mil/R\$)	43.808	20.418	1.392	625.791
	Desmatamento (ha)	2.368	535	0	76.190

Fonte: O autor, 2020.

Tabela 6 - Estatísticas descritivas dos inputs e outputs selecionados (modelos 3,4 e 5)

Variáveis		Média	Mediana	Minimo	Máximo
Inputs	Área de lavouras (ha)	13.754	6.880	5	500.981
	Área de pastagem (ha)	35.520	11.957	5	3.695.165
	Aubos (mil/R\$)	4.392	819	1	750.060
	Corretivos do solo (mil/R\$)	774	150	1	269.452
	Sementes e mudas (mil/R\$)	567	146	1	206.347
	Sacarias e embalagens (mil/R\$)	130	21	1	23.897
	Agrotóxicos (mil/R\$)	3.020	344	1	933.480
	Medicamentos para animais (mil/R\$)	882	290	4	856.436
	Sal e rações (mil/R\$)	1.883	625	1	428.788
	Transporte (mil/R\$)	509	106	1	53.378
	Energia elétrica (mil/R\$)	1.504	513	3	886.407
	Combustíveis (mil/R\$)	1.524	771	3	47.855
	Pessoal ocupado (pessoas)	3.571	2.448	68	39.883
	Output	Produção (mil/R\$)	38.336	20.729	614

Fonte: O autor, 2020.

Explicado os modelos e as variáveis utilizadas em cada um deles, a próxima seção apresenta e analisa os resultados obtidos.

4. Resultados

Inicialmente, através de programação linear, utilizando o programa R-Studio do R Core Team (2020), com os pacotes BENCHMARKING de Bogetoft e Otto (2015) foram obtidas as medidas de eficiência de cada município da região da Amazônia Legal (modelo 1) e também a eficiência dos mesmos utilizando o modelo de output indesejável com o pacote DeaR de Coll-Serrano, Bolos e Suarez (2020), tendo o desmatamento como um bad output (modelo 2). Os resultados das medidas de eficiência são apresentados na **Tabela 7** abaixo.

Tabela 7 - Resultados modelos 1 e 2

Nível de Eficiência	Nº de municípios (<i>Modelo 1</i>)	Nº de municípios (<i>Modelo 2</i>)
$E = 1$	150	166
$0,9 \leq E < 1$	24	10
$0,8 \leq E < 0,9$	16	16
$0,7 \leq E < 0,8$	28	24
$0,6 \leq E < 0,7$	25	20
$0,5 \leq E < 0,6$	47	40
$0,4 \leq E < 0,5$	75	46
$E < 0,4$	72	44
TOTAL	437	366
Medidas de Eficiência		
Média	0,70	0,75
Desvio-padrão	0,27	0,27
Coef. de variação	0,39	0,36
Mínimo	0,14	0,14
Máximo	1,00	1,00
Correlação Eff - Desm.		-0,13

Fonte: O autor, 2020.

Na média, os agricultores da Amazônia Legal tiveram uma eficiência de 0,70 no modelo 1, não levando em conta o desmatamento e 0,75 no modelo 2, no qual leva em conta o desmatamento como sendo um *bad output*. As medidas individuais mostraram que, dos 437 municípios, 150 estão operando com eficiência igual a 1 (máxima eficiência) no modelo 1, o que representa 34% do total de produtores e

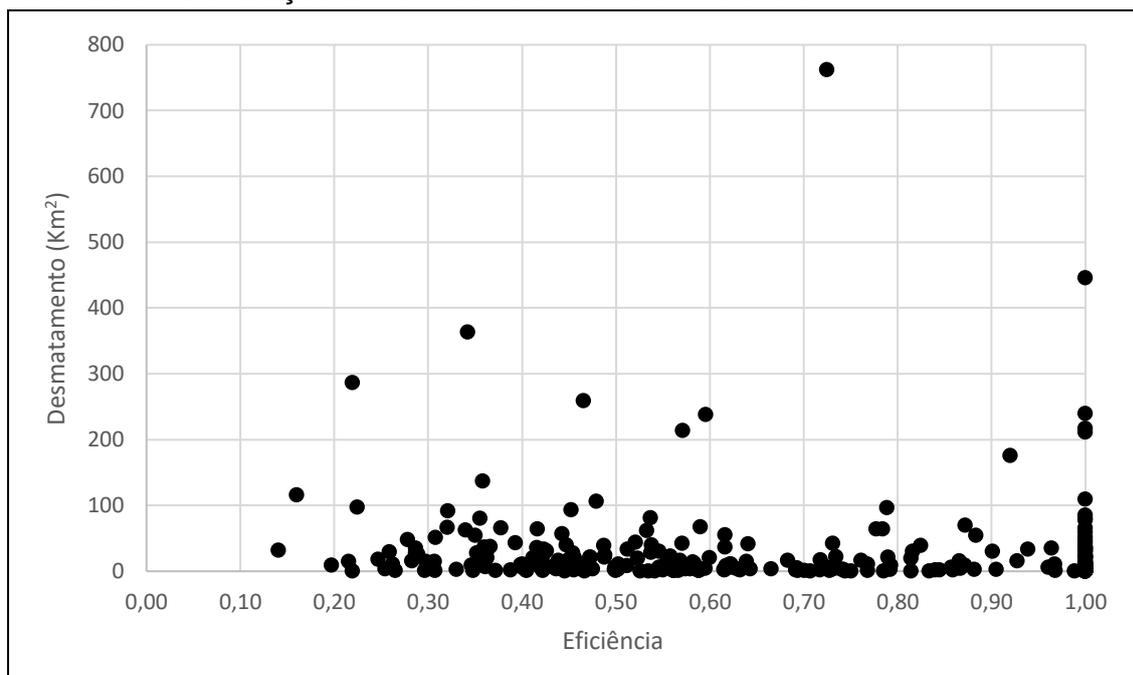
49% do valor da produção de toda a região. Já no modelo 2, dos 366 municípios, 166 operam em máxima eficiência, ou 45% do total de produtores e 59% do valor da produção total. A máxima eficiência implica que não existe outro produtor mais eficiente produzindo o mesmo nível de produto, usando a mesma combinação de insumos. Acima da média de eficiência de 0,7 encontram-se 218 municípios (50% do total e 63% da produção) no modelo 1 e 216 municípios (59% do total, mas apenas 69% da produção) no modelo 2.

Os resultados da **Tabela 7** mostram que considerar o desmatamento como um bad output não demonstrou variações significativas nos resultados agregados tendo em vista que os resultados médios e de coeficiente de variação foram muito próximos.

Segundo Marchand (2012), a relação entre eficiência técnica e o desmatamento pode ser em forma de “U” no contexto da Amazônia Legal, pois a região é caracterizada por terrenos privados "improdutivos" de acesso aberto a terras florestadas: **1)** uma fazenda pouco eficiente compensa essas ineficiências aumentando o valor relativo ao fator mais abundante, ou seja, terra; **2)** um agricultor mais eficiente poderia usar essa eficiência para investir e adquirir novas terras.

Os resultados do presente trabalho corroboram essa ideia, pois, como pode ser observado no **Gráfico 9** a seguir, municípios menos e mais eficientes apresentam altos índices de desmatamento. Além disso, O interessante a se observar neste gráfico é a alta concentração de municípios com baixo desmatamento que apresentam alto nível de eficiência.

Gráfico 9 - Correlação entre Desmatamento e Eficiência



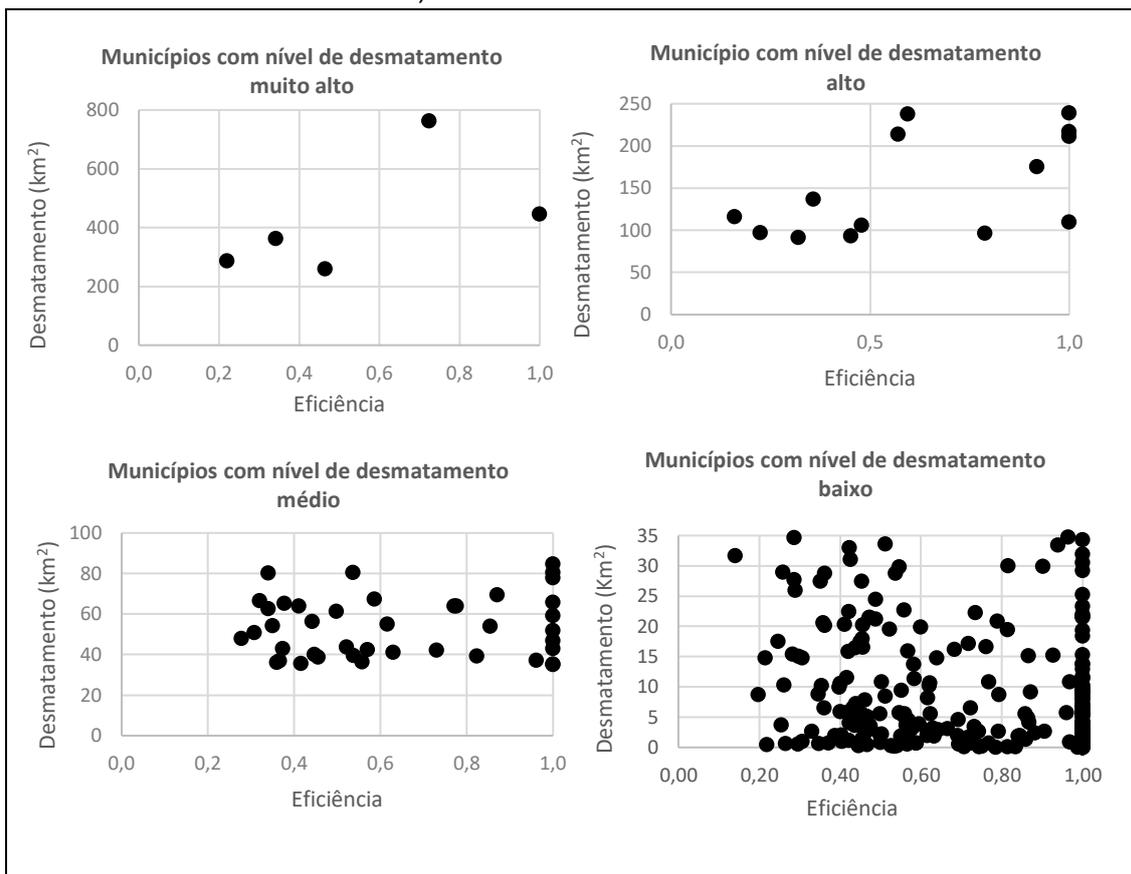
Fonte: O autor, 2020.

Devido à grande heterogeneidade no comportamento do desmatamento, as DMUs foram divididas, por quartis, entre diferentes padrões de desmatamento: municípios com muito alto, alto, médio, e baixo nível de desmatamento.

Sendo assim, no **Gráfico 10** abaixo observa-se a correlação entre o desmatamento e o nível de eficiência de cada padrão de desmatamento estabelecido e a correlação foi calculada segundo **Equação 25**, onde X e Y representam as amostras e \bar{X} e \bar{Y} são as médias dessas amostras.

$$Correl(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (25)$$

Gráfico 10 - Correlação entre Desmatamento e Eficiência (por nível de desmatamento)



Fonte: O autor, 2020.

Observa-se que as DMUs com nível de desmatamento muito alto são representadas por 5 municípios que foram responsáveis por 24% do total de desmatamento e 2,3% da produção da região. Dos 5 municípios 4 estão localizados no estado do Pará e juntos possuem 25 milhões de hectares de floresta (15% do total da região). Esses municípios apresentaram uma correlação positiva de 0,6 entre desmatamento e eficiência sugerindo que quanto maior o desmatamento maior a eficiência.

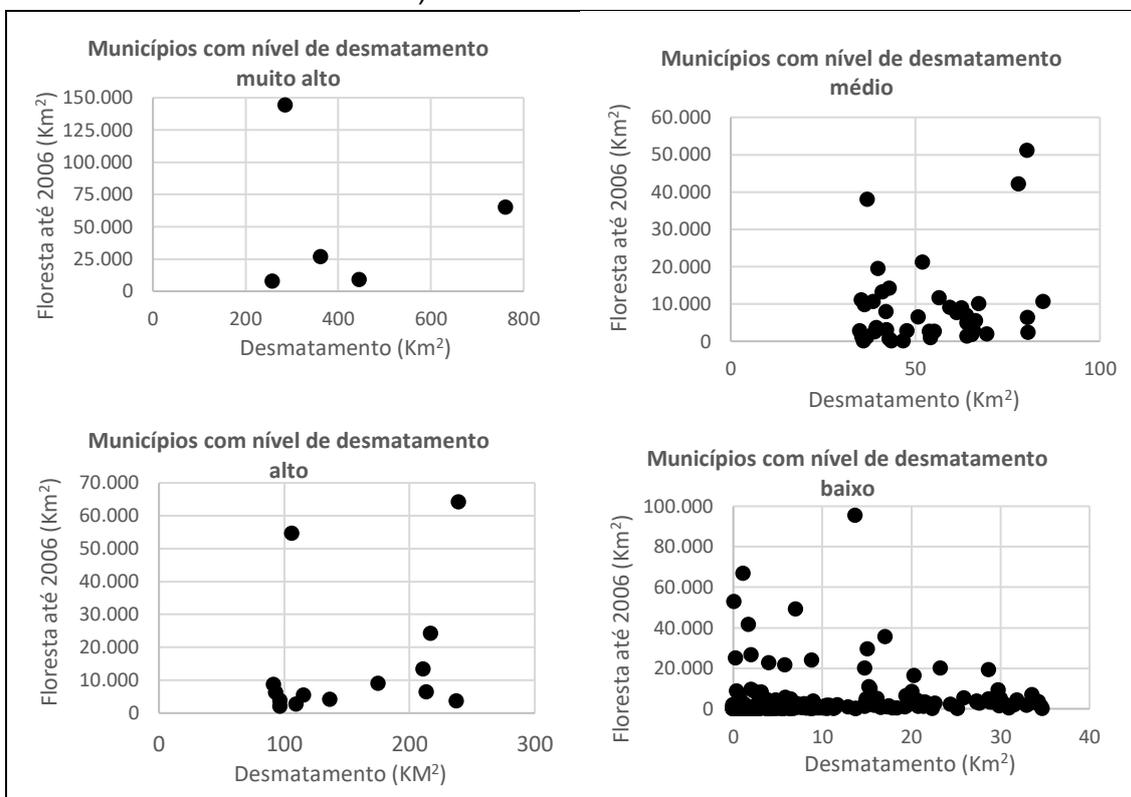
Os municípios com nível de desmatamento alto, que correspondem a 14 municípios, foram responsáveis por 25% do desmatamento total e 5,4% da produção, juntos possuem 21 milhões de hectares de floresta (12% do total) e também apresentaram uma correlação positiva de 0,6.

Municípios com nível de desmatamento médio (41 municípios), representam 25% do desmatamento total e 11,4% da produção, apresentaram correlação positiva bem fraca entre desmatamento e eficiência (apenas 0,1). Juntos possuem 36 milhões de hectares de floresta (21% do total da região).

Já os outros 306 municípios apresentam nível de desmatamento baixo, que representam os outros 26% do desmatamento total e 80,8% da produção, apresentaram uma correlação negativa fraca entre desmatamento e eficiência (-0,3) sugerindo que quanto menor o desmatamento maior a eficiência. Juntos possuem 54 milhões de hectares de floresta (52% do total).

Importante salientar que, na maioria dos casos, os municípios com maiores níveis de desmatamento coincidem com as regiões onde tem mais florestas como pode ser observado no **Gráfico 11** abaixo. Os 5 municípios com maiores níveis de desmatamento, desmatam, em média, 423 km² e possuem, em média, 50 mil km² de floresta já os municípios com nível de desmatamento baixo apresentam, em média, 3 mil km² de floresta e desmataram 7 km².

Gráfico 11 - Relação entre Desmatamento e área de floresta (por nível de desmatamento)



Fonte: O autor, 2020.

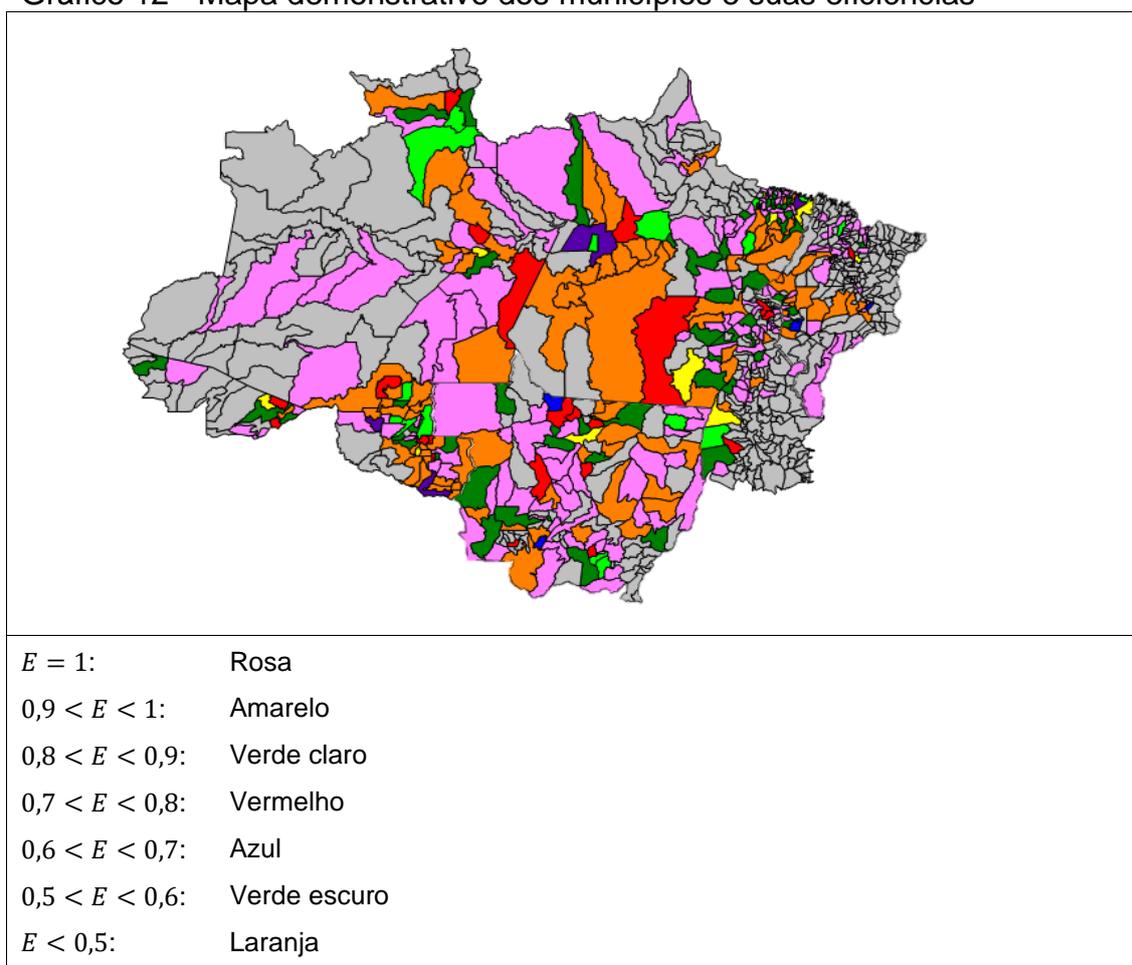
Os resultados obtidos foram georreferenciados, através do *software* IpeaGEO² versão 2.1, no mapa da região da Amazônia Legal, conforme pode ser

² *Software* gratuito, com funcionalidades estatísticas e de georreferenciamento. Além de possuir diversas ferramentas econométricas, também permite a aplicação de análises que utilizam estatística espacial (criado pela Assessoria de Métodos Quantitativos do Ipea – ASMEQ).

observado no **Gráfico 12**. Tal demonstração serve para melhor visualizar a localização geográfica dos 366 municípios e suas respectivas medidas de eficiência.

É possível observar que não existem padrões de distribuição geográfica: todos os estados apresentam municípios com máxima eficiência (região rosa) e municípios com eficiência baixa (região verde escuro e/ou laranja). As regiões cinzas são municípios que não foram considerados neste trabalho ou por não apresentarem algum input (falta de dados) ou por não apresentarem floresta, condição essencial para ocorrer o desmatamento.

Gráfico 12 - Mapa demonstrativo dos municípios e suas eficiências



Fonte: O autor, 2020.

Pode ocorrer de regiões que não são tradicionalmente agrícolas apresentarem alta eficiência, visto que é uma medida relativa que nada tem a ver com a quantidade absoluta produzida.

A **Tabela 8** a seguir apresenta os resultados para o modelo 3, onde foi medida a eficiência de todos os municípios do Brasil, através do modelo DEA / BCC com orientação *input* utilizando *bootstrap* com 2000 réplicas, utilizando o programa

R-Studio do R Core Team (2020), com o pacote BENCHMARKING de Bogetoft e Otto (2015).

Na média, os agricultores da Amazônia Legal tiveram uma eficiência de aproximadamente 0,40 enquanto que os municípios das demais regiões apresentaram média de 0,33.

Em seguida, na **Tabela 9**, é apresentado um resumo dos intervalos de confiança encontrados. Os scores de todas as DMUs estão entre os seus respectivos intervalos de confiança o que representa uma garantia estatística sobre a validade dos dados encontrados.

Tabela 8 - Resultados modelo 3

Nível de Eficiência (E)	Nº de municípios (Total)	Nº de municípios (Amazônia Legal)	Nº de municípios (Não Amazônia Legal)
$E = 1$	0	0	0
$0,9 \leq E < 1$	60	5	55
$0,8 \leq E < 0,9$	81	9	72
$0,7 \leq E < 0,8$	198	34	164
$0,6 \leq E < 0,7$	313	73	240
$0,5 \leq E < 0,6$	157	25	132
$0,4 \leq E < 0,5$	317	37	280
$E < 0,4$	2.394	254	2.140
TOTAL	3.520	437	3.083
Medida de Eficiência			
Média	0,34	0,40	0,33
Desvio-padrão	0,22	0,22	0,22
Coef de variação	0,65	0,55	0,66
Mínimo	0,04	0,07	0,04
Máximo	0,98	0,95	0,98

Fonte: O autor, 2020.

Tabela 9 - Resumo intervalo de confiança das DMUs (modelo 3)

	97,5%	2,5%
Mínimo	0,0334	0,04746
1º Quartil	0,1542	0,20083
Mediana	0,2435	0,32580
Média	0,3082	0,42253
3º Quartil	0,4238	0,57219
Máximo	0,9476	0,99774

Fonte: O autor, 2020.

Como descrito anteriormente, para verificar se esses dois grupos são passíveis a testes de comparabilidade o modelo 4 foi elaborado onde foi testada a unicidade da fronteira dividindo a amostra de 3520 municípios em duas subamostras: 437 municípios da Amazônia legal e 3083 municípios das demais regiões. Foram ajustadas as variáveis de cada fronteira para seus respectivos níveis ótimos e depois calculada uma nova fronteira com a amostra global ajustada. Os resultados obtidos encontram-se na **Tabela 10** a seguir.

Tabela 10 - Resultado do modelo 4

Nível de Eficiência (E)	Nº de municípios (Amazônia Legal)	Nº de municípios (Não Amazônia Legal)
$E = 1$	0	0
$0,9 \leq E < 1$	132	2.689
$0,8 \leq E < 0,9$	49	316
$0,7 \leq E < 0,8$	57	59
$0,6 \leq E < 0,7$	56	14
$0,5 \leq E < 0,6$	56	5
$0,4 \leq E < 0,5$	45	0
$E < 0,4$	42	0
TOTAL	437	3.083
Medida de Eficiência		
Média	0,71	0,94
Desvio-padrão	0,21	0,05
Coef de variação	0,30	0,06
Mínimo	0,26	0,56
Máximo	0,9997	0,9998

Fonte: O autor, 2020.

Pode-se observar que a diferença entre as características dos subgrupos analisados é bem evidente e desfavorável aos municípios da Amazônia Legal. Além das diferenças entre médias, coeficientes de variação e eficiência mínima dos dois grupos, apenas 30% dos municípios da Amazônia Legal apresentaram eficiência superior a 0,9 enquanto que se observarmos os municípios das demais regiões 87% tem eficiência elevada.

As medidas individuais mostraram que, dos 437 municípios da região da Amazônia Legal 132 operam com eficiência superior a 0,9 o que representa 30% dos municípios que juntos são responsáveis por 36% de toda a produção da região e 5% da produção total, sendo que a região da Amazônia Legal é responsável por 14,2% da produção total. Já se observarmos os municípios das demais regiões, 2.689 deles operam com eficiência superior a 0,9 e juntos representam 89% da produção regional e 77% da produção total.

Acima da média de eficiência de 0,7 encontram-se 238 municípios pertencentes a região da Amazônia Legal (54% dos produtores da região que representa 7,6% da produção total) e 3.064 das demais regiões (99% dos municípios da região e 86% da produção total).

O resultado do teste de *Mann-Whitney* rejeitou a hipótese nula - *valor-p* igual a zero (0,000) - de igualdade entre as fronteiras. Sendo assim, o teste rejeita a hipótese de que a fronteira seja única corroborando que realmente existe diferenças estatisticamente significativas entre os dois grupos.

Assim como no modelo anterior, no modelo 4 também foi utilizado *bootstrap* e os *scores* de todas as DMUs também estão entre os seus respectivos intervalos de confiança. Um resumo desses intervalos pode ser observado na **Tabela 11** a seguir.

Tabela 11 - Resumo intervalo de confiança das DMUs (modelo 4)

	97,5%	2,5%
Mínimo	0,2476	0,2638
1º Quartil	0,8327	0,9358
Mediana	0,8960	0,9853
Média	0,8569	0,9362
3º Quartil	0,9259	0,9989
Máximo	0,9995	1,0000

Fonte: O autor, 2020.

Os resultados para o modelo 5 são apresentados na **Tabela 12** abaixo. Para obter os resultados foi utilizado o pacote FRONTIER de Coelli e Hanningse (2020) no programa R-Studio do R Core Team (2020).

Tabela 12 - Resultados modelo 5

Variável	Estimativa	Desvio padrão	Valor p
Intercepto	1,978	0,141	< 2.2e-16*
TER	0,052	0,011	1.508e-06*
CAP	0,656	0,008	< 2.2e-16*
TRAB	0,230	0,012	< 2.2e-16*
SigmaSq	0,326	0,008	< 2.2e-16*
gamma	0,000	0,003	0.9911

Nota: *significativo a 5%

Fonte: O autor, 2020.

Como pode ser observado na tabela todas as variáveis: terra, capital e trabalho deram significativas e com sinais positivos, sugerindo uma influência positiva no valor da produção, o que era de se esperar.

Porém, o termo de ineficiência encontrado (gamma) foi insignificante sugerindo que os ruídos aleatórios são mais fortes e que não é possível separar eficiência de erros aleatórios (ruídos).

Visando aprimorar o modelo em busca de melhores resultados os dados foram rodados no programa STATA onde é possível especificar o termo de eficiência: exponencial, half-normal e normal truncada. Os resultados foram os mesmos apresentados no R, ou seja, as variáveis foram significativas, mas o termo de ineficiência foi insignificante.

Esses resultados corroboram com a conclusão anterior de que o erro aleatório predomina no modelo e que não há ineficiências a estimar utilizando o modelo de Fronteira Estocástica considerando as variáveis utilizadas.

Porém, como supracitado na **seção 3.3.1**, múltiplos trabalhos na literatura utilizaram o modelo de Fronteira Estocástica na agropecuária para o cálculo de eficiência utilizando outras variáveis.

Marchand (2012) utilizou dados do censo agropecuário de 1996 para analisar o impacto da eficiência na propensão dos agricultores da região da Amazônia Legal

a desmatar utilizando um método de duas etapas. Na primeira etapa, a eficiência técnica é estimada a partir de um modelo de SFA. Já na segunda etapa, a eficiência técnica estimada é considerada como determinante do desmatamento em um modelo de uso da terra. Os resultados sugerem que a eficiência técnica tem um efeito em forma de “U” no desmatamento: fazendas menos e mais eficientes convertem mais áreas naturais em terras agrícolas. Porém, a maioria das fazendas da região estão na inclinação ascendente, de forma que a eficiência implica em mais desmatamento.

Brito (2016) analisou a eficiência técnica somente da pecuária leiteira, também com base nos dados do Censo Agropecuário de 2006, considerando o nível de desagregação municipal, totalizando 1961 municípios distribuídos ao longo de todo o território brasileiro. Adotou o valor da produção de leite (em mil reais) como variável dependente, a qual é explicada pelos seguintes fatores de produção: número de vacas ordenhadas; trabalho (valor dos salários); área destinada à pecuária; gastos com i) medicamentos, ii) sal e rações, iii) PRONAF (Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar), iv) máquinas, implementos, tratores e veículos, v) eletricidade e vi) combustíveis. O autor estimou a fronteira estocástica de produção considerando tanto a forma funcional Cobb-Douglas quanto a translog e, além disso, admitiu que a distribuição do termo de ineficiência técnica é half-normal, encontrando, para quase todos os modelos testados, nível de eficiência em torno de 88% em média.

Souza, Gomes e Abreu (2016) utilizaram os dados municipais do Censo Agropecuário de 2006 para analisar a produção de gado de corte brasileira, considerando que a renda bruta (assumida como variável dependente) é explicada pelos gastos relacionados à terra, insumos, mão-de-obra e pela taxa de lotação (proxy para o capital). Além disso, os autores consideraram que a pecuária é afetada pelo bioma no qual o município está localizado, fator ambiental (pastagens degradadas) e assistência técnica. Os resultados não foram estatisticamente significativos para o fator ambiental, o que reflete a ausência de efeito do mesmo sobre a produção. A assistência técnica, por sua vez, teve sinal negativo, impactando negativamente a atividade. Por fim, os autores avaliaram que a eficiência técnica não destoou expressivamente conforme os biomas em que os municípios estão localizados.

Ferreira e Féres (2020) investigaram a relação entre o tamanho da propriedade e a eficiência do uso da terra na Amazônia brasileira com base nos dados do Censo Agropecuário de 2006. Foi utilizado uma abordagem econométrica em dois estágios: primeiro foi medida a eficiência técnica através do modelo de fronteira estocástica e depois, essas eficiências estimadas foram colocadas em um modelo de uso da terra para avaliar o impacto da produtividade no desmatamento. Os resultados encontrados por eles sugeriram que há muito espaço para intensificação do uso da terra, o que permitiria a expansão agrícola sem maiores pressões de desmatamento. Além disso, observaram uma relação em forma de “U” entre o tamanho da fazenda e a eficiência do uso da terra e os estabelecimentos típicos da região da Amazônia localizam-se na inclinação descendente da curva, ou seja, há uma relação negativa entre o tamanho da propriedade e a eficiência do uso da terra, o que significa que o atual processo de concentração fundiária observado na região resultaria em aumento da ineficiência do uso do solo.

CONCLUSÃO

A região da Amazônia Legal vem sofrendo com o aumento do desmatamento há anos, e grande parte desse desmatamento recente resulta da agropecuária de grande e médio porte que, segundo os números de produção e a literatura, trata-se de uma pecuária de baixa produtividade.

Nesse contexto o presente estudo propôs investigar se diferenças na produtividade da terra pode ser explicada pela baixa eficiência e pelo aumento do desmatamento. Para isso o trabalho utilizou os modelos DEA e SFA que são utilizados na literatura para medir a eficiência na agropecuária.

No primeiro modelo foi calculada a eficiência dos municípios da Amazônia Legal e comparado com o segundo modelo que acrescenta o desmatamento como output indesejável. No terceiro modelo calculou-se a eficiência de todos os municípios do Brasil, com foco nos municípios da Amazônia Legal, utilizando-o para a criação do modelo quatro onde foi testada a unicidade da fronteira. Todos esses modelos foram feitos utilizando o modelo DEA/BCC com orientação input. Já no modelo 5 utiliza-se SFA para o cálculo da eficiência.

Os resultados obtidos no modelo DEA que considera desmatamento como um *bad output* demonstra fraca correlação entre desmatamento e eficiência, quando observados em agregado, com muitos municípios apresentando baixo desmatamento e alta eficiência.

Porém, ao estratificar a amostra em diferentes níveis de desmatamento, observa-se que 19 municípios com nível de desmatamento alto (que representam 49% do desmatamento da região) apresentaram correlação positiva entre desmatamento e eficiência sugerindo que ao aumentar ainda mais o desmatamento aumenta-se a eficiência. Esses municípios estão localizados em uma área de 46 milhões de hectares de floresta o que representa 27% da floresta da região.

Por outro lado, 306 municípios apresentaram nível de desmatamento baixo com correlação negativa entre eficiência e desmatamento, indicando que municípios que já não desmatam, ou desmatam pouco, apresentam menos incentivos para desmatar. Esses municípios estão localizados em uma área de 88 milhões de hectares de floresta o que representa 52% da floresta da região.

Importante salientar que os 19 municípios que apresentaram alto nível de desmatamento estão localizados em uma grande área de floresta. Os 19 municípios desmatam, em média, 22 mil hectares e possuem, 2,4 milhões de hectares de floresta, em média. Já os 306 municípios com nível de desmatamento baixo, desmatam, em média, 700 hectares e estão localizados numa região de 300 mil hectares de floresta. Pode-se notar que o desmatamento potencial, ou a região com maior propensão a aumentar o desmatamento, está bastante concentrada nos 19 municípios e que são justamente estes que possuem maiores incentivos a desmatar para aumentar eficiência (correlação positiva). Esta pode ser uma informação importante para os formadores de políticas públicas que trabalham no combate ao aumento do desmatamento.

Já os resultados dos modelos que consideraram todos os municípios do Brasil demonstraram que os municípios da Amazônia Legal apresentaram em média menor eficiência em relação aos demais municípios e o teste de *Mann-Whitney* serviu para confirmar que realmente existe diferenças estatisticamente significativas entre os dois grupos.

Mesmo com a aparente diferença entre as medidas de eficiências desfavoráveis aos municípios da Amazônia Legal, não é possível afirmar que essas diferenças são totalmente responsáveis pela baixa produtividade da terra que se observa na região, pois os modelos consideram vários outros inputs além da área utilizada, como adubos, agrotóxicos, energia etc.

Porém, considerando as variáveis utilizadas no presente trabalho é possível indicar que os municípios não eficientes da região da Amazônia Legal poderiam economizar R\$2.637.161.100 em adubos, agrotóxicos e outros insumos, 656.852.600 em mão de obra e 16.698.291.700 hectares de lavouras e pastagens se comparados aos municípios eficientes, o que poderia contribuir na diminuição do desmatamento.

Essas informações poderiam ser utilizadas para definir políticas públicas e privadas condicentes com a otimização para a política de combate ao desmatamento. Para reforçar e realizar essas melhorias é recomendado um estudo *in loco* dos municípios mais eficientes que permita entender os fatores determinantes da alta eficiência e expandir tais tecnologias para os demais municípios.

Os resultados do modelo SFA sugerem que os ruídos aleatórios são mais fortes e que não é possível separar eficiência de erros aleatórios (ruídos). Como já foi supracitado, diferentes autores na literatura obtiveram melhores resultados, porém, com amostras menores focados em apenas uma atividade agropecuária e/ou região o que pode ser testado em desdobramentos futuros desta pesquisa.

Nesse sentido, o presente trabalho pretende servir de subsídio a futuras pesquisas na área, contribuindo com uma ampla revisão de literatura sobre os modelos de eficiência na agropecuária e um exemplo prático que pode ajudar na orientação de políticas públicas e privadas.

Porém, é necessário salientar que os resultados dos modelos DEA estão condicionados a amostra das unidades avaliadas, aos dados e as variáveis incluídas no trabalho bem como, ao princípio de que todos os demais fatores envolvidos são idênticos. Por ser a eficiência uma medida relativa, acréscimo ou exclusão de unidades e/ou variáveis pode ocasionar em resultados diferentes.

REFERÊNCIAS

- AFRIAT, S.N. Efficiency estimation of production functions. *International Economic Review.*, Pennsylvania, v.13, p.568-598, 1972.
- AHEARN, M. et al. Agricultural productivity in the United States. USDA: Economic Research Service, 1998.
- AIGNER, D.; LOVELL, C. A. K.; SCHMIDT, P. S. Formulation and estimation of stochastic frontier models. *Journal of econometrics*, [S.l.], v. 6, p. 21-37, 1977.
- AJIBEFUN, I.A.; DARAMOLA, A.G.; FALUSI, A.O. Technical efficiency of small scale farmers: an application of the stochastic frontier production function to rural and urban farmers in Ondo State, Nigeria. *International economic journal*, Seoul, [S.l.], v.20, n.1, p.87-107, mar. 2006.
- ALMEIDA, P. N. A. *Fronteira de produção e eficiência técnica da agropecuária brasileira em 2006* - Piracicaba, 2012. 205 p. : il. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W.W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, [S.l.], v. 30, p.1078-1092, 1984.
- BAPTISTA, A.J.M.S.; CASTRO, E.R.; TEIXEIRAS, E.C. Discriminação da função de produção, elasticidades de substituição de fatores na agropecuária do Estado de Minas Gerais. *Revista de Economia, Agronegócio*, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 161- 182, 2004.
- BARROS, E. de S.; COSTA, E. de F.; SAMPAIO, Y. Análise de eficiência das empresas agrícolas do pólo Petrolina/Juazeiro utilizando a fronteira paramétrica translog. *Revista de economia e sociologia rural*, Brasília, v.42, n.4, p.597-614, out./dez. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_serial&pid=0103-2003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01 nov. 2020.
- BATTESE, G. E.; CORRA, G. S. Estimation of a production frontier model: with application to the pastoral zone of Eastern Australia. *Australian journal of agricultural economics*, [S.l.], v. 21, n. 3, p.169 - 179, Dec. 1977.
- BOGETOFT, P.; OTTO, L. *Benchmarking with DEA, SFA, and R*. 157. ed. New York: Springer, 2011.
- BOGETOFT, P.; OTTO, L.; *Package "Benchmarking"* - version 0.26, 2015. Disponível em < [Benchmarking.pdf](#) (r-project.org) > Acesso em: 14 jul. 2020.
- BOSHRABADI, H.M.; VILLANO, R.; FLEMING, E. Technical efficiency and environmental-technological gaps in wheat production in Kerman province of Iran. *Agricultural economics*, Malden, v.38, n.1, p.67-76, 2008.

BOZOGLU, M.; CEYHAN, V. Measuring the technical efficiency and exploring the inefficiency determinants of vegetable farms in Samsun province, Turkey. *Agricultural systems*, Malden, v.94, n.4, p.649-656, 2007.

BRANDÃO, Antônio Salazar P. Elementos de uma estratégia para o desenvolvimento da agricultura na região Amazônica. Rio de Janeiro, nov. 2010. Este trabalho foi elaborado em decorrência da apresentação feita pelo autor no seminário "Amazônia: Visão Estratégica", realizado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, nos dia 12 e 13 de outubro em Brasília.

BRITO, R. A. *Há espaços para melhora no setor leiteiro? Uma análise de fronteira estocástica de produção e regressão quantílica utilizando dados do Censo Agropecuário 2006 (IBGE)*. 2016. 138 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

BROCKETT, P. L.; GOLANY, B. Using rank statistics for determining programmatic efficiency differences in data envelopment analysis. *Management science*, [S.l.], v. 42, n. 3, p. 466-472, Mar. 1996.

CAMPOS, S. A. C.; COELHO, A. B.; GOMES, A. P. Influência das Condições Ambientais e Ação Antrópica Sobre a Eficiência Produtiva Agropecuária em Minas Gerais. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, [S.l.], v. 50, n. 03, p. 563-576, 2012.

CAMPOS, S.A.C; FERREIRA NETO, J.A. Eficiência técnica dos produtores de leite em assentados rurais da reforma agrária. *Revista de economia e agronegócio*, Viçosa, v.6, n.3, p.395-414, 2008.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Evaluating program and managerial efficiency: an application of data envelopment analysis to program follow through. *Management science*, [S.l.], v. 27, n. 6, p. 668-697, June 1981.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, [S.l.], v. 2, p.429-444, 1978.

CHUNG, Y. H.; FARE, R.; GROAAKOPF, S. Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. *Journal of Environmental Management*, [S.l.], v.51, p 229-240, nov. 1997.

COELLI, T.; HENNINGSEN A.; *Stochastic Frontier Analysis*. R package version 15/04/2020. Disponível em <<https://cran.r-project.org/web/packages/frontier/frontier.pdf>> Acesso em: 26 nov. 2020.

COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; O'DONNELL, C. J.; BATTESE, G. E. *An introduction to efficiency and productivity analysis*. 2. ed. United States of America: Springer, 1998. p.341.

COLL-SERRANO V.; BOLOS V.; SUAREZ R.B. *Conventional and Fuzzy Data Envelopment Analysis*. R package version 21/02/2020. Disponível em < <https://cran.r-project.org/web/packages/deaR/deaR.pdf> > Acesso em: 25 dez. 2020.

CONSTANTIN, P.D.; MARTIN, D.L.; RIVERA, E.B.B. de R. y. Cobb-Douglas, translog stochastic production function and data envelopment analysis in total factor productivity in Brazilian agribusiness. *Journal of operations and supply chain management*, São Paulo, v.2, n.2, p.20-34, dec. 2009.

CRUZ, F. P. *Análise da eficiência técnica das prestadoras brasileiras de saneamento*. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Econômicas) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DEBREU, G. The coefficient of resource utilization. *Econometrica*, [S.l.], v.19, p. 273 - 292, 1951.

DEY, M.M; PARAGUAS, F.J.; KAMBEWA, P.; PEMSL, D.E. The impact of integrated aquaculture-agriculture on small-scale farms in Southern Malawi. *Agricultural economics*, Malden, v.41, n.1, p.67-79. 2010.

EFRON, B; Computers and the theory of statistics: thinking the unthinkable. *SIAM Review*, [S.l.], p. 460 - 480, 1979.

FARRELL, M.J. The measurement of productive efficiency of production. *Journal of the Royal Statistical Society*, [S.l.], v.120, n.3, p. 253 – 281, 1957.

FERREIRA, Adilson Hélio. *Eficiência de sistemas de produção de leite: uma aplicação da análise envoltória de dados na tomada de decisão*. 2002. 120 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2002.

FERREIRA, C. M. de C.; GOMES, A. P. *Introdução à Análise Envoltória de Dados: teoria, modelos e aplicações*. 2.ed. Viçosa: Ufv, 2009.

FERREIRA, M. D. P.; FÉRES, J. G.. *Farm size and Land use efficiency in the Brazilian Amazon*. Land Use Policy, v. 99, 2020. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837719311123?via%3Dihub> >. Acesso em: 25 fev. 2021.

GOMES, A.P. *Impactos das transformações da produção de leite no número de produtores e requerimentos de mão de obra e capital*. 1999. 161p. Tese (Doutorado em Economia Rural) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

GOMES, E. G. Uso de Modelos DEA em Agricultura: Revisão da Literatura. *Engevista*, v. 10, n. 1, p.27-51, jun. 2008.

GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S.; MANGABEIRA, J. A. C. Estudo da Sustentabilidade Agrícola em um Município Amazônico com Análise Envoltória de Dados. *Pesquisa Operacional*, [S.l.], v. 29, n. 1, p.23-42, abr. 2009.

GOMES, E.G.; MANGABEIRA, J.A.C.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B. Análise de envoltória de dados para avaliação de eficiência e caracterização de tipologias em agricultura: um estudo de caso, *Revista de Economia & Sociologia Rural*, Rio de Janeiro, v. 43, n. 04, p. 607-631, out/dez 2005.

GOMES, E.G.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; BIONDI NETO, L. *Avaliação de eficiência por Análise de Envoltória de Dados: conceitos, aplicações à agricultura e integração com Sistemas de Informação Geográfica*. 28 ed. Campinas: EMBRAPA, 2003. 39 p. Disponível em: < https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPM/1251/1/d28_envoltdados_vf.pdf. > Acesso em: 14 jun. 2021.

GONÇALVES, R.M.L.; VIEIRA, W. da C.; LIMA, J.E. de L.; GOMES, S.T. Analysis of technical efficiency of milk-producing farms in Minas Gerais. *Economia aplicada*, Ribeirão Preto, v.12, n.2, p.321-335, abr./jun. 2008.

GSTACH, D. Comparing structural efficiency of unbalanced subsamples: a resampling adaptation of data envelopment analysis. *Empirical economics*, [S.l.], v. 20, p. 531-542, 1995.

GULATI, S.; MISHRA, A. A Non-Parametric Analysis of Returns to Scale in US Agriculture. In: American Agricultural Economic Association (AAEA) *Annual Meeting*. 1999, Nashville, Tennessee. *Anais...* [S.l.: s.n], 1999.

HADLEY, D. Patterns in technical efficiency and technical change at the farm-level in England and Wales, 1982-2002. *Journal of agricultural economics*, Oxford, UK, v.57, n.1, p.81-100, mar. 2006.

HOMEM DE SOUZA, D.P.; ALVES, E. Dois critérios para avaliação de eficiência técnica. *Revista de Economia, Agronegócio*, [S.l.],v. 1, n. 3, p. 373-396, 2003.

HOMMA, A. K. O. et al. O desenvolvimento mais sustentável da região amazônica: entre (muitas) controvérsias e o caminho possível. Colóquio: *Revista do Desenvolvimento Regional*, Taquara, v. 17, n. 4, out. 2020.

HOMMA, A. Política agrícola ou política ambiental para resolver os problemas da Amazônia? *Revista de Política Agrícola*, [S.l.], v. 19, n. 1, p. 99-102, mar. 2010.

IBGE. *Censo Agropecuário 2006*. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/CA/A/Q> >. Acesso em: 11 fev. 2021.

IRÁIZOZ, B.; RAPÚN, M.; ZABALETA, I. Assessing the technical efficiency of horticultural production in Navarra, Spain. *Agricultural systems*, Amsterdam, v.78, n.3, p.387-403, Dec. 2003.

KOOPMANS, T. C. *Analysis of production as an efficient combination of activities*. Nova York: Wiley, 1951.

LEÃO, C.; RIBEIRO, F.L.; LIMA, J.E. de. Determinação do padrão de eficiência técnica da agricultura brasileira, 1970-1995. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 40., 2002. Passo Fundo. *Anais...* Brasília: SOBER, 2002. 1 CDROM.

LOPES, B. A. G. *Ecoeficiência na Agropecuária: Uma Aplicação de Análise Envoltória de Dados - DEA nos Municípios Brasileiros da Região Norte*. 2014. 183 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2014.

MACEDO, M. A. S.; CÍPOLA, F. C.; FERREIRA, A. F. R. Desempenho social no agronegócio brasileiro: aplicando DEA no segmento de usinas de processamento de cana-de-açúcar. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, [S.l.], v. 48, n. 01, p. 223-243, 2010.

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*, Brasília, v.44, n.4, p.695-711, out./dez. 2006.

MAPBIOMAS. Disponível em: <<http://mapbiomas.org/map#coverage>>. Acesso em: 07 jan. 2021.

MARCHAND, S.; The relationship between technical efficiency in agriculture and deforestation in the brazilian amazon. *Ecological Economics*, [S.l.], v.77, p. 166-175. 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800912000894>>. Acesso em: 25 fev. 2021.

MARGULIS, S. *Causas do Desmatamento da Amazônia Brasileira*. Banco Mundial, trabalho em andamento para discussão pública, julho de 2003. Também publicado como World Bank Working Paper No. 22, dezembro de 2003.

MARIANO, J.L.; PINHEIRO, G.M.T.L. Eficiência técnica da agricultura familiar no projeto de irrigação do Baixo Açu (RN). *Revista econômica do Nordeste*, Fortaleza, v.40, n.2, p.283-296, abr./jun. 2009.

MARINHO, A.; FAÇANHA, L. O. Hospitais universitários: avaliação comparativa de eficiência técnica. *Economia aplicada*, [S.l.], v. 4, n. 2, p. 315-349, abr./jun. 2000.

MARTINS, M. M.; *Análise da eficiência técnica da pecuária de corte para regiões brasileiras selecionadas: uma análise de fronteira estocástica*. 2019. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Econômicas, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2019.

MEEUSEN, W.; VAN DEN BROECK, J. Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. *International economic review*, [S.l.], v.18, n.2, p. 435 - 444, June 1977.

MIRANDA, E.E.; MARTINHO, P.R.R. ; CARVALHO, C.A. *Nota técnica sobre queimadas, desmatamentos e imóveis rurais no bioma Amazônia em 2019*. Campinas: Embrapa Territorial, 2020.

MORAIS, G. A. S. et al. Eficiência técnica e produtividade de total dos fatores da agricultura dos países da América do Sul: uma análise dos países- membros e não-membros do Mercosul. *Revista Ciências Administrativas*, [S.l.],v. 22, n. 2, p. 396-422. Jul/dic. 2016 Universidade de Fortaleza Fortaleza, Brasil.

NASCIMENTO, A. C. C. et al. Eficiência técnica da atividade leiteira em Minas Gerais: uma aplicação de regressão quantílica. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Viçosa, v. 41, n. 3, p. 783-789, mar. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982012000300043&lng=e n&nrm=iso>. Acesso em: 18 fev. 2021.

NEHRING, R. et al. Small U.S. dairy farms: can they compete? *Agricultural economics*, Malden, v.40, issue supplement s1, p.817-825, nov. 2009.

NOGUEIRA, M. A.; *Eficiência técnica na agropecuária das microrregiões brasileiras*. 2005. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Economia Aplicada, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/9085> > . Acesso em: 25 fev. 2021.

OLIVEIRA, H. N. C.; *Eficiência produtiva dos estabelecimentos agropecuários brasileiros: uma análise para grupos de área total*. 2013. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia Aplicada, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/73> > . Acesso em: 25 fev. 2021.

PACHIEL, M. G.; *Eficiência produtiva de usinas de cana-de-açúcar do estado de São Paulo*. 2009. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3245> > . Acesso em: 25 fev. 2021.

PADRÃO, G. A. et al. Environmental efficiency and opportunity cost of the Forest Code for the Amazon. In: RIO+20 - *International Society for Ecological Economics Conference*. Rio de Janeiro. International Society for Ecological Economics Conference, 2012.

PARETO, V. *Manuale di Economia Politica*, *Piccola Biblioteca Scientifica*, Milan, Translated into English by A.S. Schwier (1971), MacMillan, London, 1906.

PEREIRA FILHO, C.A. *Eficiência econômica da pequena produção familiar agrícola no recôncavo do Estado da Bahia: uma análise não-paramétrica de fronteiras de produção multi-produto*. 2000. 122p. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

PEREIRA, M.F. *Mensuramento da eficiência multidimensional utilizando a análise de envelopamento de dados: revisão da teoria e aplicações*. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

PEREIRA, M.F. *Evolução da fronteira tecnológica múltipla e da produtividade total dos fatores do setor agropecuário brasileiro de 1970 a 1996*. 1999. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PEREIRA, M.F.; SILVEIRA, J.S.T. da.; PARRÉ, J.L.; ALVES, A.F. *Mensuração da eficiência técnica na agropecuária brasileira através da estimação econométrica de fronteiras de produção*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 39., 2001. Recife. *Anais...* Brasília: SOBER, 2001.
PEREIRA, M.F.; SILVEIRA, J.S.T. *Evolução da eficiência técnica no setor agropecuário brasileiro: 1985-1995*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL – SBPO, 33., 2001, Campos do Jordão. *Anais...*, São Paulo :[S.I.], 2001. p. 12-20.

POZO, D.T. *Análisis económico y eficiencia del sector público*. In: CONGRESO INTERNACIONAL DEL CLAD SOBRE LA REFORMA DEL ESTADO Y DE LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA, 7., 2002, Lisboa. *Resumos...* Lisboa, Portugal: [S.I.], 2002.

PRIOR, D. *Technical efficiency and scope economies in hospitals*. *Applied Economics*, v. 28, p. 1.295-1.301, 1996.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. Disponível em < <https://www.R-project.org/> > Acesso em: 01 nov.2020.

RICHETTI, A.; REIS, R.P. *Fronteira de produção e eficiência econômica na cultura da soja no Mato Grosso do Sul*. *Revista de economia e sociologia rural*, Brasília, v.41, n.1, p.45-61, jan./mar. 2003.

ROBERTS, D. B. *Eficiência da pequena produção de leite no estado de Rondônia*. 2003. 79 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2003.

ROSANO-PEÑA, C. et al. *A measure of sustainability of Brazilian agribusiness using directional distance functions and data envelopment analysis*. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, [S.I.], v. 21, n. 03, p. 210-222, 2014.

ROSANO-PEÑA, C.; DAHER, C. E. *The Impact of Environmental Regulation and Some Strategies for Improving the Eco-Efficiency of Brazilian Agriculture*. In: GUARNIERI, P. (Ed.). *Decision Models in Engineering and Management*. 17. ed. London: Springer, 2015. v. 17, p. 295-322.

ROSANO-PEÑA, C.; DAHER, C. E.; MEDEIROS, O. R. *Ecoeficiência e Impacto da Regulação Ambiental na Agropecuária Brasileira com Funções Distância Direcionais*. In: ENCONTRO DA ANPAD, 37, 2013. Rio de Janeiro/RJ. *Anais...* Rio de Janeiro/RJ: ENANPAD, 2013. Disponível em: <http://www.anpad.org.br/admin/pdf/2013_EnANPAD_GOL435.pdf>. Acesso em: 31 out. 2020.

SANTOS, J.A. dos.; VIEIRA, W. da C.; BAPTISTA, A.J.M. dos S. Eficiência técnica na produção de leite em pequenas propriedades da microrregião de Viçosa, MG. *Revista de economia e agronegócio*, Viçosa, v.2, n.2, p.261-290, 2004.

SHAFIQ, M.; REHMAN, T. The extend of resource use inefficnecies in cotton production in Pakistan's Punjab: an application of data envelopment analysis. *Agricultural Economics*, v. 22, p. 321-330, 2000.

SHARMA, K.R.; LEUNG, P.S.; ZALESKI, H.M. Technical, allocative and economic efficiencies in swine production in Hawaii: a comparison of parametric and nonparametric approaches. *Agricultural economics*, Malden, v.20, n.1, p.23-35, jan. 1999.

SHEPHARD, R.W.; *Theory of Cost and Production Functions*. Princeton University Press: Princeton, New Jersey, 1970.

SHERLUND, S.M.; BARRETT, C.B.; ADESINA, A. A. Smallholder technical efficiency controlling for environmental production conditions. *Journal of development economics*, Amsterdam, v.69, n.1, p.85-101, oct. 2002.

SILVA J.L.M . A eficiência técnica na produção de uva e manga na região do Vale do São Francisco: uma aplicação de funções fronteiras de produção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 40., 2002.Passo Fundo. *Anais...* Brasília: SOBER, 2002.

SILVA J.L.M.; SAMPAIO, Y. de S.B. A eficiência técnica dos colonos nos perímetros irrigados em Petrolina e Juazeiro: uma análise de modelos de fronteiras de produção. *Revista econômica do Nordeste*, Fortaleza, v.33, n.2, p.159-179, 2002.

SILVA, J.L.M. da. Ineficiência técnica e desperdício da água na fruticultura irrigada no Vale do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 39., 2001. Recife. *Anais...* Brasília: SOBER, 2001.

SILVA, R.G. da.; FERREIRA JÚNIOR, S. Eficiência técnica: uma análise comparativa entre Acre e Rondônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 40., 2002. Passo Fundo. *Anais...* Brasília: SOBER, 2002.

SIMAR, L.; WILSON, P. Sensitivity analysis of efficiency scores: how to bootstrap in nonparametric frontier models. *Management science*, [S.l.], v. 44, n. 1, p. 49-61, 1998.

SOUZA, D.P.H. *Avaliação de métodos paramétricos e não paramétricos na análise da eficiência da produção de leite*. 2003. 136f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada), Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

SOUZA, G. S.; GOMES, E. G.; ABREU, U. G. P.; Modelo de produção para a pecuária de corte brasileira com base em dados censitários: abordagens determinística e estocástica com hipótese de endogeneidade. *Rev. de Economia*

Agrícola, São Paulo, v. 63, n. 1, p. 21-34, 2016. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/328772559_MODELO_DE_PRODUCAO_P_ARA_A_PECUARIA_DE_CORTE_BRASILEIRA_COM_BASE_EM_DADOS_CENSITARIOS_abordagens_deterministica_e_estocastica_com_hipotese_de_endogeneidade >. Acesso em: 18 fev. 2021.

SOUZA, G.S.; ÁVILA, A.F.D.; ALVES, E. Significância de efeitos técnicos na eficiência de produção da pesquisa agropecuária. *Revista Brasileira de Economia*, [S.l.], v. 60, n. 1, p. 69-86, 2006.

SOUZA, G.S.; ÁVILA, A.F.D.; ALVES, E. Technical efficiency of production in agricultural research. *Scientometrics*, [S.l.], v. 46, n. 1, p. 141-160, 1999.

SOUZA, G.S.; GOMES, E. G.; GAZZOLA, R. Eficiência técnica na agricultura brasileira: uma abordagem via fronteira estocástica. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 13., 2010, Rio de Janeiro. *Anais...* Disponível em: < <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/23570/1/eficiencia-tecnica-na-agricultura.pdf> >. Acesso em: 01 nov. 2020.

SOUZA, P.C.T.; WILHELM, V.E. Avaliação de produtividade da eficiência técnica em unidade de produção de leite do estado do Paraná (programa de leite da região de Guarapuava – PR). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL – SBPO, 33. 2001, Campos do Jordão. *Anais...*, São Paulo, 2001.

STURION, L. *Uma avaliação do potencial da Análise de Envoltória de Dados (DEA) no diagnóstico da produtividade de unidades de produção agropecuária*. 1996. 76 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

TORESAN, L. *Sustentabilidade e desempenho produtivo na agricultura: Uma Abordagem Multidimensional Aplicada a Empresas Agrícolas*. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

TOWNSEND, R.F.; KIRSTEN, J.; VINK, N. Farm size, productivity and returns to scale in agriculture revisited: a case study of wine producers in South Africa. *Agricultural Economics*, [S.l.], v. 19, n. 1, p. 175- 180, 1998.

VALE, P. M.; ANDRADE, D. C.; Comer carne e salvar a Amazônia? A produtividade da pecuária em Rondônia e sua relação com o desmatamento. *Estudo Sociedade e Agricultura*, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 381-408, 2012.

VICENTE, J.R. Economic efficiency of agricultural production in Brazil. *Revista de economia e sociologia rural*, Brasília, v.42, n.2, p.201-222, abr./jun. 2004. Disponível em: < https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_serial&pid=0103-2003&lng=en&nrm=iso >. Acesso em: 31 out. 2020.

VIEIRA, J. *Ecoeficiência da agropecuária goiana com análise envoltória de dados e funções distância direcionais*. 2015, 93 f. Dissertação. (Mestrado em Agronegócio) –

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

ZILLI, J.B. *Os fatores determinantes para a eficiência econômica dos produtores de frango de corte: uma análise estocástica*. 2003. 139 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.