

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

Decomposição da produtividade total dos fatores da lavoura de milho no Brasil,  
1995/96 a 2017

**Felipe Miranda de Souza Almeida**

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

Piracicaba  
2023

Felipe Miranda de Souza Almeida  
Bacharel em Ciências Econômicas

Decomposição da produtividade total dos fatores da lavoura de milho no Brasil, 1995/96 a  
2017

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **HUMBERTO FRANSISCO SILVA SPOLADOR**

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

Piracicaba  
2023

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

Almeida, Felipe Miranda de Souza

Decomposição da produtividade total dos fatores da lavoura de milho, 1995/96 a 2017 / Felipe Miranda de Souza Almeida - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011- - Piracicaba, 2023.

68 p.

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

1. Produtividade 2. Produtividade total dos fatores 3. Fronteira estocástica 4. Milho I. Título

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso meu profundo agradecimento a Deus, por Sua bênção, capacitação e por me fortalecer ao longo desta jornada. "Até aqui o Senhor nos ajudou" (1 Samuel 7.12).

Gostaria de estender meus agradecimentos aos meus pais, Geovacil e Ednamar, aos meus irmãos Mateus e Gisela, à minha esposa Cássia e aos demais membros da minha família. Obrigado por cada oração, pelo amor incondicional, carinho e incentivo.

Um agradecimento especial ao Professor Humberto Francisco Silva Spolador, expresso minha sincera gratidão por sua orientação, inspiração, apoio, sabedoria e encorajamento ao longo do meu doutorado. Também gostaria de agradecer aos meus orientadores da graduação e do mestrado, Professores Newton Paulo Bueno e Adriano Provezo Gomes, que, juntamente com o Professor Humberto, me auxiliaram e guiaram nessa busca pelo conhecimento. Além disso, gostaria de agradecer aos Professores Lilyan Fulginiti e Richard Perrin pelas orientações e suporte até o momento.

Também gostaria de expressar minha gratidão aos amigos Aduino Rocha Junior, Ana Beatriz, Ana Carolina, André Danelon, Atanaele Bernardo, Augusto Seabra, Gabriel Ervilha, Gabriel Machado, Giovani Gianetti, Gustavo Lobo, João Felema, Juliane Luz, Lucas Lima, Rosimere Fortini, William Barbosa, Willian Arboléya e Wilman Iglesias. Suas conversas, amizade, orientações e compartilhamento de conhecimento foram fundamentais ao longo desta jornada. Esta caminhada não teria sido a mesma sem vocês.

Agradeço ao Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, em particular à Nicole, ao Professor Geraldo e a todos os membros da equipe Macroeconomia, pela oportunidade de participar como pesquisador e pelos conhecimentos compartilhados. Também expresso minha gratidão ao Gabriel e à Ana Carolina pela amizade, companheirismo e parceria no trabalho.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, especialmente aos professores do Departamento de Economia, Administração e Sociologia, agradeço a oportunidade de aprimoramento gratuito e de excelência. Também gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, uma vez que este trabalho foi realizado com o suporte da CAPES - Código de Financiamento 001.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho. Seus esforços e apoio foram inestimáveis e sou profundamente grato por sua colaboração

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE MILHO NO BRASIL .....	13
2.2. PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES .....	17
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
3.1. ANÁLISE DE FRONTEIRA ESTOCÁSTICA.....	21
3.2. ANÁLISE DE PRODUTIVIDADE.....	22
3.3. BASE DE DADOS E VARIÁVEIS INCLUÍDAS NO MODELO EMPÍRICO .....	24
3.4. ESTRATÉGIA EMPÍRICA.....	26
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE MILHO NO BRASIL, UM OLHAR SOB OS CENSOS AGROPECUÁRIOS ....	31
4.2. EFICIÊNCIA E PRODUTIVIDADE NA PRODUÇÃO DE MILHO NO BRASIL .....	40
4.3. IMPACTO DA ADOÇÃO DE PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS NA PRODUTIVIDADE DO MILHO .....	48
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>66</b>

## RESUMO

### **Decomposição da produtividade total dos fatores da produção de milho no Brasil, 1995/96 a 2017**

O milho é uma cultura agrícola de destaque no Brasil, amplamente distribuída nas diferentes regiões do país e que desempenha um papel relevante na alimentação humana e animal. Embora tenham sido observados avanços produtivos nos últimos anos, é essencial manter essas tendências para garantir a segurança alimentar, especialmente diante do aumento populacional, da renda e do uso de biocombustíveis, que demandam matérias-primas provenientes de culturas alimentares. Apesar do crescimento da produtividade, a produção de milho impacta os processos biológicos, físicos e químicos do ambiente, se fazendo necessária a adoção de tecnologias que reduzam o impacto ambiental, como a rotação de culturas e o plantio direto. A intensificação da produção, a melhoria da eficiência no uso de recursos e os ganhos de produção, produtividade e qualidade da lavoura são estratégias fundamentais para que esse segmento cumpra sua função de oferecer alimentos e matéria-prima e contribua para o desenvolvimento econômico do setor agrícola brasileiro. Adicionalmente, compreender o avanço da produtividade é um dos objetivos fundamentais da pesquisa econômica, uma vez que seu crescimento oferece à sociedade a chance de elevar o seu bem-estar, além de fornecer informações importantes para os formuladores de políticas públicas. Neste contexto, a presente pesquisa teve como objetivo investigar a evolução da produtividade total dos fatores (PTF) da lavoura de milho do Brasil no período de 1995 a 2017, e avaliar o impacto da adoção de práticas conservacionistas como plantio direto e rotação de cultura, na produtividade da lavoura por meio de um modelo de fronteira estocástica, decompondo o crescimento da PTF para identificar os seus principais determinantes. Os resultados indicam que o crescimento médio da PTF foi de 0,76% a. a. no período de 1995/96 a 2017, sendo impulsionado principalmente pela mudança tecnológica, que cresceu a uma taxa média de 0,826% a. a.. Os índices que explicam as mudanças na produtividade devido a fatores observados e não observados relacionados ao ambiente de produção e às mudanças da eficiência técnica também afetaram positivamente a produtividade, mas em magnitudes menores. Por outro lado, os efeitos de escala e as mudanças nas condições climáticas tiveram um efeito médio limitado, impactando negativamente a produtividade da cultura. Quanto à análise do efeito da adoção das práticas como plantio direto e rotação de culturas sobre a produtividade, tem-se que a taxa média de crescimento do índice foi 0,093% a. a. no período entre 2006 e 2017, apresentando resultados médios heterogêneos entre as Unidades da Federação. Estados onde se observou uma maior proporção de estabelecimentos que adotaram estas práticas experimentaram impactos médios mais significativos se comparados aos que possuíam uma menor proporção de adotantes.

**Palavras-chave:** Produtividade; Produtividade total dos fatores; Fronteira estocástica; Milho

## ABSTRACT

**Total factor productivity decomposition of corn production in Brazil, 1995/96 to 2017**

Corn is a prominent agricultural crop in Brazil, widely distributed in different regions of the country, and playing a crucial role in human and animal nutrition. Although production advances have been observed in recent years, it is essential to maintain these trends to ensure food security, especially in face of increasing population, income, and its use on biofuels production, which demand raw materials from food crops. Despite the positive performance, corn production impacts the biological, physical, and chemical processes of the environment, making necessary the adoption of technologies that reduce the environmental impact, such as crop rotation and no-till farming. The production intensification, the improvement of the efficiency in the use of resources, and the gains in production, productivity, and quality in crops are fundamental strategies to the sector keeps its contribution to the country's economic development, therefore, still require research to achieve higher levels of efficiency and productivity in agri-food systems. Additionally, understanding the advance of productivity is one of the fundamental objectives of the economic research, since its growth increases welfare, as well provides important information for policymakers. In this context, the present research aimed to investigate the evolution of total factor productivity (TFP) in Brazilian corn production in the period from 1995 to 2017, and evaluate the impact of the adoption of conservationist practices no-till and crop rotation on the productivity of the crop using the stochastic frontier framework to decompose the TFP growth. The results indicate that TFP growth was 0.76% per year over the period 1995/96 to 2017, being driven primarily by technological change, which grew at an average rate of 0.826% per year. The indexes explaining changes in productivity due to observed and unobserved factors related to the production environment and change in technical efficiency also positively affected productivity, but in low magnitudes. On the other hand, scale effects and change in climatic conditions presented a medium limited effect, negatively impacting crop productivity. Regarding the analysis of the adoption of no-till and crop rotation practices effects on productivity, the average growth rate of the index was 0.093% per year. in the period between 2006 and 2017, suggesting average heterogeneous results among the units of the federation. States with a higher proportion of establishments adopting these practices experienced more significant average impacts compared to those with a lower proportion of adopters.

**Keywords:** Productivity; Total factor productivity; Stochastic frontier; Corn

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da área plantada, da produção e do rendimento médio dos grãos no Brasil entre as safras 1976/77 e 2021/22.....	9
Figura 2: Evolução da área colhida, da produção e da produtividade do milho (em grão) no Brasil entre as safras 1976/77 e 2021/22.....	10
Figura 3: Evolução do VBP agrícola, da soja, da cana-de-açúcar e milho e a participação do VBP do milho em relação ao VBP agrícola no período de 1994 a 2021 .....	13
Figura 4: Evolução da área plantada de milho entre as safras 1976/77 e 2021/22.....	14
Figura 5: Evolução da produção de milho entre as safras 1976/77 e 2021/22 .....	15
Figura 6: Participação da produção de milho para estados selecionados em cada uma das safras brasileiras .....	16
Figura 7: Variação do número de estabelecimentos, do valor da produção, da quantidade produzida e da área colhida da cultura do milho do Brasil e das regiões nos períodos de 1995/96 a 2006, de 2006 a 2017 e de 1995/96 a 2017 ..	33
Figura 8: Proporção do número de estabelecimentos, do valor da produção, da quantidade produzida e da área colhida da cultura do milho do Brasil por grupo de área colhida em 1995/96, 2006 e 2017 .....	36
Figura 9: Distribuição espacial das eficiências técnicas médias por município no período entre 1995/96 e 2017 .....	43
Figura 10: Variação percentual da PTF, por estado, nos períodos 1995/96-2006, 2006-2017 e 1995/96-2017 .....	48
Figura 11: Distribuição espacial das eficiências técnicas médias por município no período entre 2006 e 2017 .....	51
Figura 12: Histograma dos escores de eficiências técnicas do modelo 1 no período entre 1995/96 e 2017 .....	64
Figura 13: Histograma dos escores de eficiências técnicas do modelo 1 para os anos censitários em análise .....	64
Figura 14: Histograma dos escores de eficiências técnicas do modelo 2 no período entre 2006 e 2017 .....	65
Figura 15: Histograma dos escores de eficiências técnicas do modelo 2 para os anos censitários em análise .....	65
Figura 16: Calendário de plantio e colheita do milho 1ª Safra .....	66
Figura 17: Calendário de plantio e colheita do milho 2ª Safra .....	67
Figura 18: Calendário de plantio e colheita do milho 3ª Safra .....	68



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Área, produção e produtividade do milho (1ª, 2ª e 3ª safras) para as diferentes regiões e Unidades da Federação do Brasil na safra 2021/22 .....	17
Tabela 2: Descrição das variáveis utilizadas no estudo.....	26
Tabela 3: Estatística descritiva das variáveis utilizadas no modelo de fronteira estocástica (modelo 1).....	27
Tabela 4: Estatística descritiva das variáveis utilizadas no modelo de fronteira estocástica (modelo 2).....	29
Tabela 5: Número de estabelecimentos, valor da produção, quantidade produzida e a área colhida da cultura do milho do Brasil e das regiões nos Censos Agropecuários de 1995/96, 2006 e 2017 .....	32
Tabela 6: Rendimento médio da cultura do milho do Brasil e das UFs nos Censos Agropecuários de 1995/96, 2006 e 2017.....	35
Tabela 7: Número de pessoas ocupadas e de equivalente-homem total nos estabelecimentos produtores de milho e número de estabelecimentos que possuem pelo menos uma pessoa ocupada ou pelo menos uma unidade de equivalente-homem total por uma unidade no Brasil e suas regiões, 1995/96, 2006 e 2017 .....	37
Tabela 8: Número de tratores e implementos agrícolas no Brasil e suas regiões, 1995/96, 2006 e 2017 .....	38
Tabela 9: Número de estabelecimentos agropecuários produtores de milho que adotaram plantio direto e rotação de cultura, possui capacidade de armazenagem, participa de cooperativa, tem acesso à assistência técnica e possui o milho como atividade principal.....	39
Tabela 10: Resultados do modelo empírico, modelo 1.....	40
Tabela 11: Médias das eficiências técnicas no período entre 1995/96 e 2017 e as médias anuais para o Brasil e para as Unidades da Federação.....	42
Tabela 12: Variação percentual da PTF e dos seus componentes por estado, 1995/96-2017 .....	44
Tabela 13: Variação percentual da PTF e dos seus componentes por estado, 1995/96-2006 .....	46
Tabela 14: Variação percentual da PTF e dos seus componentes por estado, 2006-2017 .....	47
Tabela 15: Resultados do modelo empírico, modelo 2.....	49
Tabela 16: Médias das eficiências técnicas no período entre 2006 e 2017 e as médias anuais para o Brasil e para as Unidades da Federação.....	50
Tabela 17: Variação percentual da PTF e dos seus componentes por estado, 2006-2017.....	52

## 1. INTRODUÇÃO

O agronegócio é um importante setor para a geração de emprego, renda e divisas do Brasil, desempenhando, assim, um papel importante no crescimento da economia do país. Em 2022, o setor representou 24,8% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (CEPEA, 2023), empregou aproximadamente 18,97 milhões de pessoas (19,35% da população ocupada no país) (CEPEA; FEALQ, 2023) e gerou um saldo comercial de US\$ 141,63 bilhões, com as exportações representando 47,6% das exportações totais (MAPA, 2023).

A agricultura e a pecuária são as atividades fundamentais que compõem o agronegócio brasileiro, e oferecem oportunidades de investimento e crescimento da produção (ALVES; BACHA, 2018). Essas atividades têm passado por diversas transformações desde o seu processo de modernização, que possibilitou as incorporações de técnicas e tecnologias que alteraram as formas de produção agropecuária que, por sua vez, proporcionaram elevados ganhos de produtividade, fato que tem se destacado nas últimas décadas (ALVES; BACHA, 2018; BACHA, 2018).

Ao se analisar a evolução da área plantada, da produção e do rendimento médio dos grãos<sup>1</sup> no Brasil entre as safras 1976/77 e 2021/22, apresentada na Figura 1, observa-se que a produção de grãos chegou a 271,41 milhões toneladas na última safra. No mesmo período, a área plantada, que era de 37,31 milhões de hectares na safra 1976/77, alcançou 74,48 milhões de hectares na safra 2021/22. Este resultado evidencia o ganho produtivo do Brasil neste segmento, atingindo um rendimento médio de 3,64 toneladas por hectare, o que representou um crescimento de 189,69% no período.

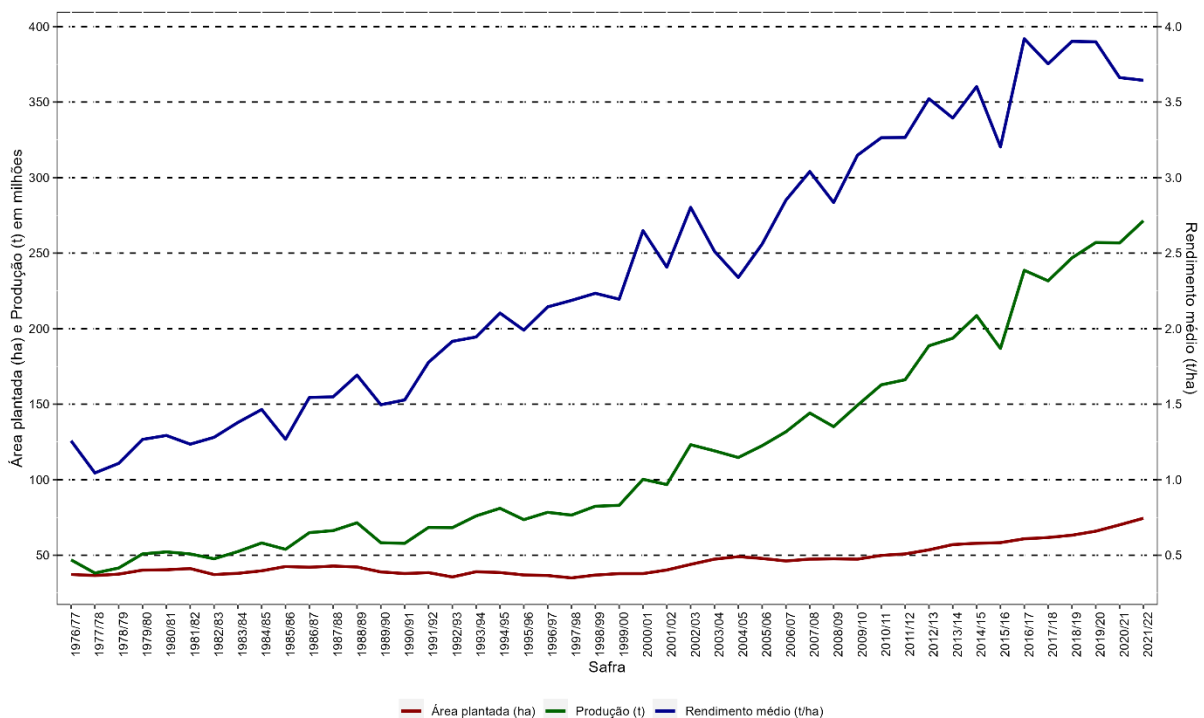


Figura 1: Evolução da área plantada, da produção e do rendimento médio dos grãos no Brasil entre as safras 1976/77 e 2021/22

Fonte: Elaborado com base em CONAB (2023)

<sup>1</sup> Os grãos considerados são: algodão (caroço); amendoim, arroz; aveia; canola; centeio; cevada; feijão; gergelim, girassol; mamona, milho; soja; sorgo; trigo e triticale.

Segundo Gasques et al. (2020), entre 1970 e 2017 o produto agropecuário cresceu em média 3,22% ao ano, enquanto os insumos avançaram em 1,17%, na média para o período. Este resultado ressalta que a agricultura tem crescido principalmente pelos ganhos de produtividade, verificados pela taxa de crescimento anual da Produtividade Total dos Fatores (PTF) de 2,03% no período mencionado. Complementando, Gasques et al. (2022) estimaram que, entre 1975 e 2020, a PTF da agropecuária brasileira apresentou uma taxa de crescimento média de 3,33% ao ano, sendo que as taxas anuais de crescimento do produto e insumos ficaram em torno de 3,79% e 0,45%, respectivamente.

Dentre as culturas agrícolas produzidas no Brasil, o milho se destaca devido à sua distribuição pelas regiões brasileiras (IBGE, 2022) e à sua grande importância na alimentação humana e animal (ALVES; BACHA, 2018). É importante ressaltar que o grão também possui múltiplas aplicações na indústria, tais como a fabricação de materiais de construção civil, papel e papelão, cosméticos e produtos químicos (ALVES; BACHA, 2018). Segundo o IBGE (2022), o valor da produção do milho representou 15,7% do valor da produção da agricultura no ano de 2021, sendo superado apenas pela soja, que foi responsável por 46%. De 2001 a 2020, a cultura do milho gerou um PIB de R\$ 715 bilhões, 9% do valor gerado pela agropecuária (CEPEA, 2021).

Análoga à Figura 1, na Figura 2 é apresentada a evolução da área plantada, da produção e do rendimento médio do milho (em grão) no Brasil entre as safras 1976/77 e 2021/22. Assim, como no caso dos grãos em geral (Figura 1), observa-se o ganho produtivo da cultura, uma vez a produção cresceu 485,97% enquanto a área plantada cresceu 82,93% no período analisado. De acordo com CEPEA (2021), 50,4% do PIB gerado pela cultura entre 2001 e 2020, ou seja, R\$ 360 bilhões, foi devido à maior produtividade da cultura.

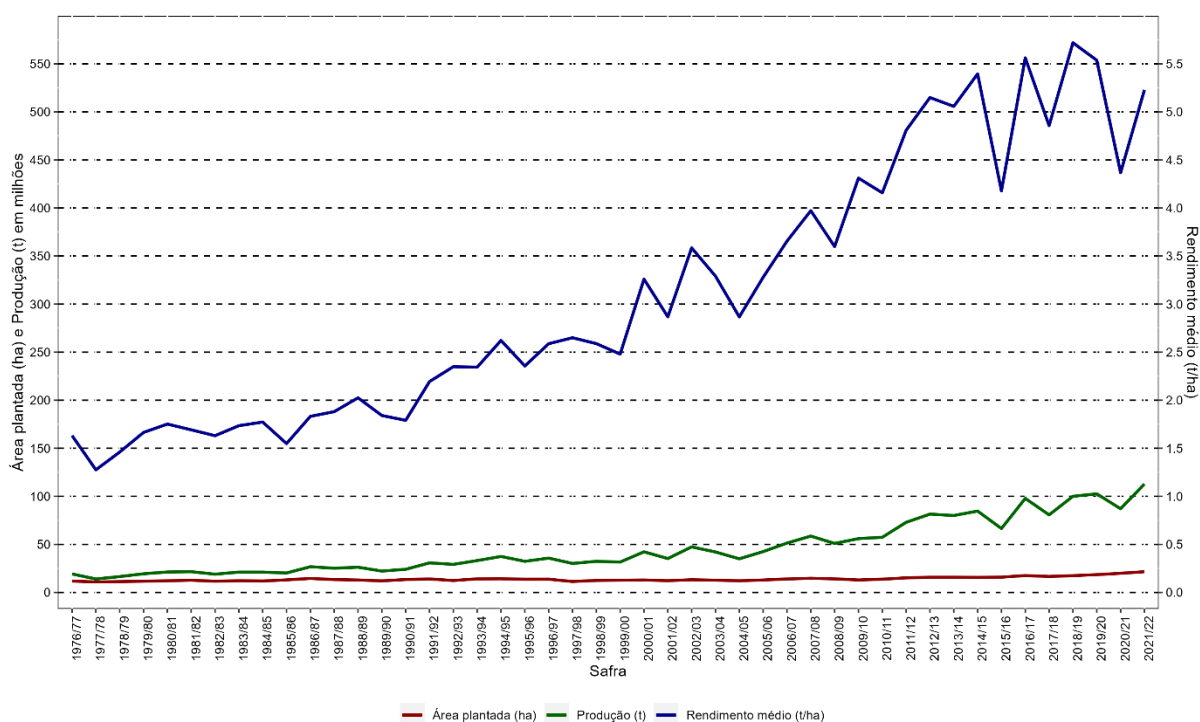


Figura 2: Evolução da área colhida, da produção e da produtividade do milho (em grão) no Brasil entre as safras 1976/77 e 2021/22

Fonte: Elaborado com base em CONAB (2023)

Segundo Alves, Contini e Gasques (2008), Gasques et al. (2010), Bacha (2018), Alves et al. (2018) e Gasques et al. (2020), os ganhos produtivos na produção de grãos e, especialmente, de milho estão relacionados com a pesquisa agropecuária liderada pela Empresa de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), e ainda com políticas agrícolas,

de extensão rural, com a incorporação de áreas com maiores produtividades, com o uso eficientes dos fatores de produção e com maiores investimentos e desenvolvimentos de tecnologias mais modernas, adaptadas às condições edafoclimáticas brasileiras.

Embora os ganhos de produtividade do setor agrícola tenham aumentado a disponibilidade de alimentos, é crucial manter essas tendências para garantir a segurança alimentar, especialmente com o aumento contínuo da população, da renda e do uso de biocombustíveis, que requerem matérias-primas de culturas alimentares (BALDOS; HERTEL, 2014; BARRETT, 2021). De acordo com Machado, Bacha e Johnston (2020), a intensificação da produção e a melhoria da eficiência no uso de insumos e recursos são estratégias fundamentais para que as atividades que compõem a agropecuária cumpram suas funções no desenvolvimento econômico, quais sejam garantir as ofertas de alimentos e matéria-prima. .

Os ganhos de produção, produtividade e qualidade das lavouras são essenciais para o atendimento da demanda global por alimentos (FUGLIE, 2018) e, portanto, ainda requerem pesquisas com o intuito de alcançar maiores níveis de eficiência nos sistemas agroalimentares. Adicionalmente, compreender o avanço da produtividade é um dos objetivos fundamentais da pesquisa econômica, uma vez que seu crescimento oferece à sociedade a chance de elevar o seu bem-estar (FUGLIE; SCHIMMELPFENNIG, 2010), além de fornecer informações importantes para os formuladores de políticas públicas.

Entretanto, apesar do desempenho observado, a cultura do milho e as demais atividades agrícolas promovem alterações nos processos biológicos, físicos e químicos do ambiente. Segundo Dalin e Rodríguez-Iturbe (2016), Feix, Miranda e Barros (2010), McLaughlin e Mineau (1995) e Mello e Rocha (2004), a atividade agrícola pode ter diversos impactos ambientais negativos como a contaminação do solo e da água com substâncias químicas via utilização intensiva de água e fertilizantes sintéticos, desmatamento, perda de biodiversidade e emissão de gases de efeito estufa (GEE). Dessa forma, torna-se relevante a utilização de tecnologias que reduzam o impacto ambiental.

Destaca-se, no entanto, que a agricultura pode ser feita de maneira mais sustentável, com o uso de práticas que reduzem os impactos ambientais, como a agricultura de conservação<sup>2</sup> e práticas agroecológicas. Assim, a implementação de uma série de práticas e medidas conservacionistas, tais como a rotação de culturas, a adubação verde e o sistema de plantio direto (SPD), podem contribuir com a mitigação de efeitos negativos da produção agrícola (FRANCHINI et al., 2011; HUYNH et al., 2019).

O manejo adequado do solo e a adoção de práticas agrícolas conservacionistas são estratégias que buscam amenizar o impacto ambiental da atividade agrícola e aumentar as produtividades das culturas e o uso eficiente dos recursos (BESEN et al., 2018; SAPKOTA et al., 2015). Erenstein et al. (2012), Jat et al. (2014), Kumar et al. (2013), Parajuli et al. (2016) e Sapkota et al. (2015) mostraram que a adoção de práticas conservacionistas, em especial a agricultura de conservação, promove aumentos na produção e na produtividade das culturas, reduz os custos de produção, melhora a eficiência no uso dos recursos (por exemplo: água; nutrientes; e energia) e pode fornecer benefícios de adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

De modo geral, os produtores integram em seus sistemas de produção uma variedade de práticas agrícolas visando o aumento da produtividade e da sustentabilidade da produção, até mesmo para contornar restrições impostas pela natureza, como a disponibilidade hídrica. Dados os benefícios agronômicos, econômicos e ambientais

---

<sup>2</sup> A agricultura de conservação é uma abordagem agrícola que tem como objetivo preservar ou melhorar a saúde do solo enquanto promove uma produção agrícola sustentável e rentável. Os princípios fundamentais dessa abordagem incluem a perturbação mínima do solo, a manutenção de cobertura permanente do solo e a rotação e diversificação de culturas. Em resumo, a agricultura de conservação visa aprimorar a produtividade e a resiliência dos sistemas agrícolas, enquanto minimiza os seus impactos negativos no meio ambiente (FRIEDRICH et al., 2012; PITTELKOW et al., 2015).

da adoção dessas práticas, tem havido esforços para a difusão e adoção destas, visto que possibilitam ganhos produtivos e reforçam a sustentabilidade da produção agrícola, principalmente por meio da conservação dos recursos naturais, e do uso eficiente dos insumos. Exemplos importantes desses esforços são as implementações do Programa ABC e do Programa ABC+, que buscam promover a adoção de tecnologias e práticas sustentáveis na agricultura, visando reduzir as emissões de GEE provenientes dessa atividade, e tornar a agropecuária mais sustentável (BRASIL, 2012, 2021).

Por isso, entender o impacto da adoção das práticas agrícolas como adoção do plantio direto e rotação de culturas sobre a produtividade da cultura do milho é importante para alcançar uma agricultura sustentável. Os agricultores precisam identificar práticas e sistemas de produção que façam o melhor uso dos recursos disponíveis, aumentem a produtividade e minimizem o potencial impacto ambiental para alcançarem uma produção sustentável, do ponto de vista econômico e ambiental, uma vez que a degradação ambiental reduz a capacidade de produção do sistema.

Vários estudos têm sido conduzidos para avaliar a produtividade agrícola no Brasil (ALVES; CONTINI; GASQUES, 2008; BRAGAGNOLO; SPOLADOR; BARROS, 2010, 2021; GASQUES et al., 2022; MACHADO; BACHA; JOHNSTON, 2020), porém, faltam pesquisas que analisem de forma mais detalhada os determinantes da produtividade da cultura do milho no país, a exemplo do que foi feito por Soares e Spolador (2019) com a produção de milho no estado de São Paulo. Além disso, ao avaliar o impacto de práticas conservacionistas como plantio direto e rotação de culturas na produtividade de culturas, a falta de estudos sobre culturas de milho no Brasil representa um desafio significativo. Sem essas informações, é difícil entender completamente os potenciais benefícios da adoção dessas práticas e seu impacto na produtividade de milho no Brasil.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo investigar a evolução da produtividade total dos fatores (PTF) na produção de milho do Brasil no período de 1995 a 2017 e avaliar impacto da adoção das práticas conservacionistas plantio direto e rotação de cultura na produtividade da cultura no período de 2006 a 2017. Também é realizada uma decomposição de crescimento da PTF para os mesmos períodos, com o objetivo de mensurar a importância de cada um dos seus componentes.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Caracterização da produção de milho no Brasil

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho e, como mencionado anteriormente, a cultura é uma das espécies agrícolas de destaque no país, tanto em termos de área quanto de volume de produção. Na Figura 3 é apresentada a evolução do valor da produção (VBP) agrícola e das três culturas mais importantes (levando em consideração os últimos cinco anos, 2017-2021), bem como a representatividade do VBP do milho com relação ao VBP agrícola. Observa-se que, na média do período, a cultura do milho representou 11,90% do valor da produção agrícola, com menor participação em 2010 (9,85%) e maior em 2021 (15,66%). Em termos reais<sup>3</sup>, o VBP do milho cresceu 152,14% no período analisado.

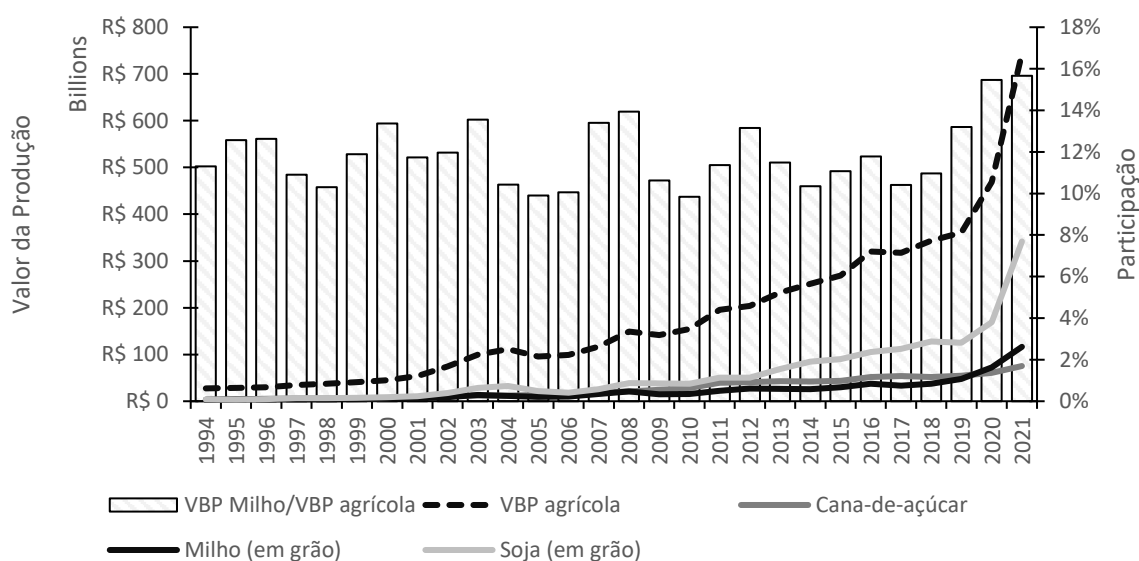


Figura 3: Evolução do VBP agrícola, da soja, da cana-de-açúcar e milho e a participação do VBP do milho em relação ao VBP agrícola no período de 1994 a 2021

Fonte: Elaborado com base em IBGE (2022)

Como evidenciado na Figura 2, os maiores valores da produção do milho são reflexos do maior rendimento médio da cultura, uma vez que a taxa de crescimento da área não acompanhou o avanço da produção do grão e houve uma desvalorização real dos preços<sup>4</sup> do milho, no período de 1994 a 2021 (IBGE, 2022).

No Brasil, o milho é predominantemente cultivado em dois períodos do ano, primeira safra (safra verão) e segunda safra (milho “safrinha”<sup>5</sup>), e mais recentemente na terceira safra<sup>6</sup>. A safra verão tem sua semeadura no segundo semestre de cada ano, com colheita no primeiro semestre do ano seguinte. Já a segunda safra tem seu

<sup>3</sup> Corrido pelo Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna (IGP-DI) (2021=100) (FGV, 2022).

<sup>4</sup> Calculado via divisão do valor bruto da produção pela quantidade produzida.

<sup>5</sup> O termo teve origem na década de 1970, em que se iniciou o cultivo em áreas restritas e de baixa produtividade no estado do Paraná (GALVÃO; TROGELLO; PEREIRA, 2015).

<sup>6</sup> Nos Anexo A-C, apresenta-se o calendário de plantio e colheita do milho no Brasil para as três safras, considerando cada Unidade da Federação.

plântio no primeiro semestre de cada ano, com colheita até setembro, podendo se prolongar em algumas regiões (ALVES et al., 2018).

A terceira safra do milho é devido à tendência de crescimento do plântio nos estados Alagoas, Amapá, Bahia, Pernambuco, Roraima e Sergipe, em que a sementeira se concentra entre os meses de maio e junho, período semelhante ao do hemisfério norte. Anteriormente à safra 2018/19, esta safra era contabilizada juntamente com a segunda, apesar do período distinto de semeio e colheita.

Na Figura 4 e na Figura 5 são apresentadas as evoluções da área plantada e da produção do milho no Brasil entre as três safras no período de 1976 a 2022, respectivamente. Observa-se na Figura 4 que desde a safra de 1979/80, em que apenas 1,25% da área era destinada ao cultivo de segunda safra, esta vem ganhando representatividade em detrimento da primeira safra. No ano agrícola de 1995/96, a primeira safra de milho ocupou 87,49% da área plantada, enquanto a segunda safra representou 12,51%, evoluindo para 74,46% e 25,54%, respectivamente, em 2005/06. Essas proporções mudaram em 2016/17, com a primeira safra correspondendo a 31,17% e a segunda safra a 68,83%. Na safra mais recente analisada, a primeira safra representou 21,08% da área plantada, a segunda safra ocupou 75,85% e a terceira safra contribuiu com 3,06%.

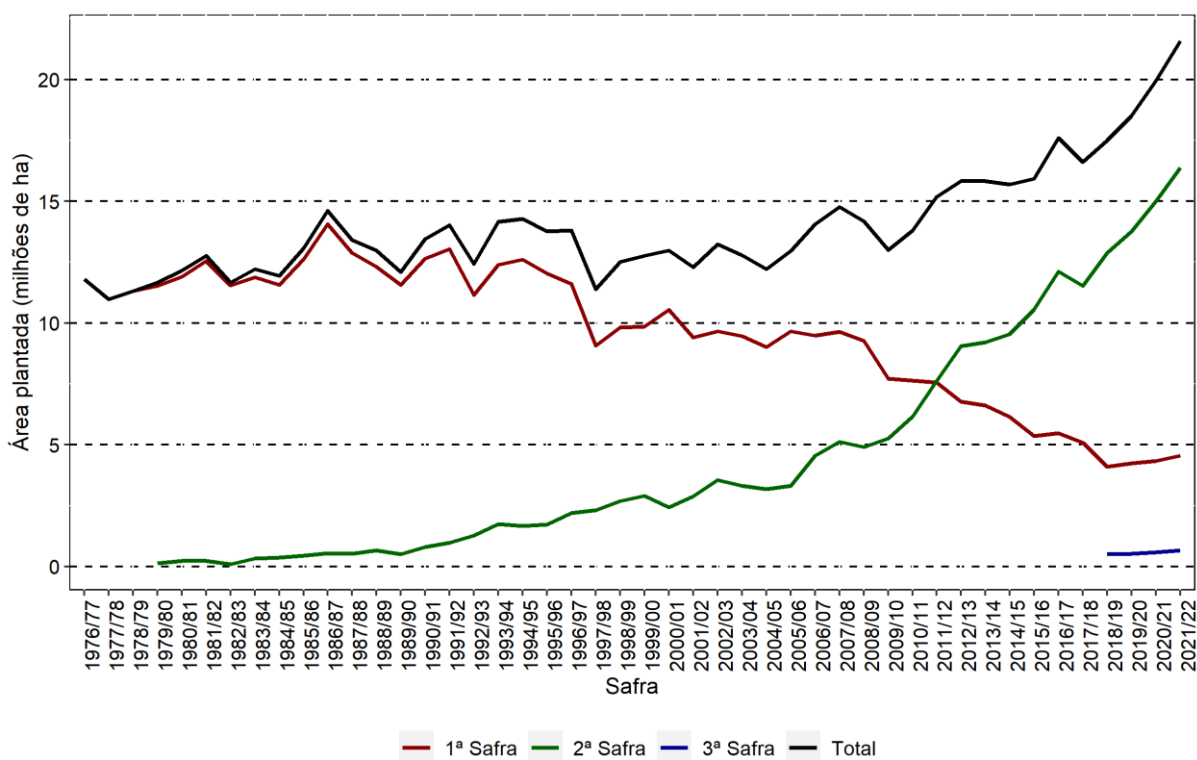


Figura 4: Evolução da área plantada de milho entre as safras 1976/77 e 2021/22

Fonte: Elaborado com base em CONAB (2023)

Com relação à produção, Figura 5, o comportamento é semelhante. Na safra 1979/80 a produção da safra verão representava 99,6% da produção enquanto o milho “safrinha” representava apenas 0,4%. Entretanto, nas safras 1995/96, 2005/06 e 2016/17 a “safrinha” representava 10,8%, 25,2% e 68,9%, respectivamente. Em 2021/22 as três safras representaram 22,2%, 75,9% e 1,9%, respectivamente.

Destaca-se a safra 2011/12 da cultura, pois nesta temporada, a segunda safra passa a ter maiores participações tanto na área plantada quanto na produção, representando 50,2% e 53,6%, respectivamente. A partir desse período, observa-se que a maior oferta do grão no Brasil está relacionada com o avanço do cultivo na segunda safra, em detrimento das demais.

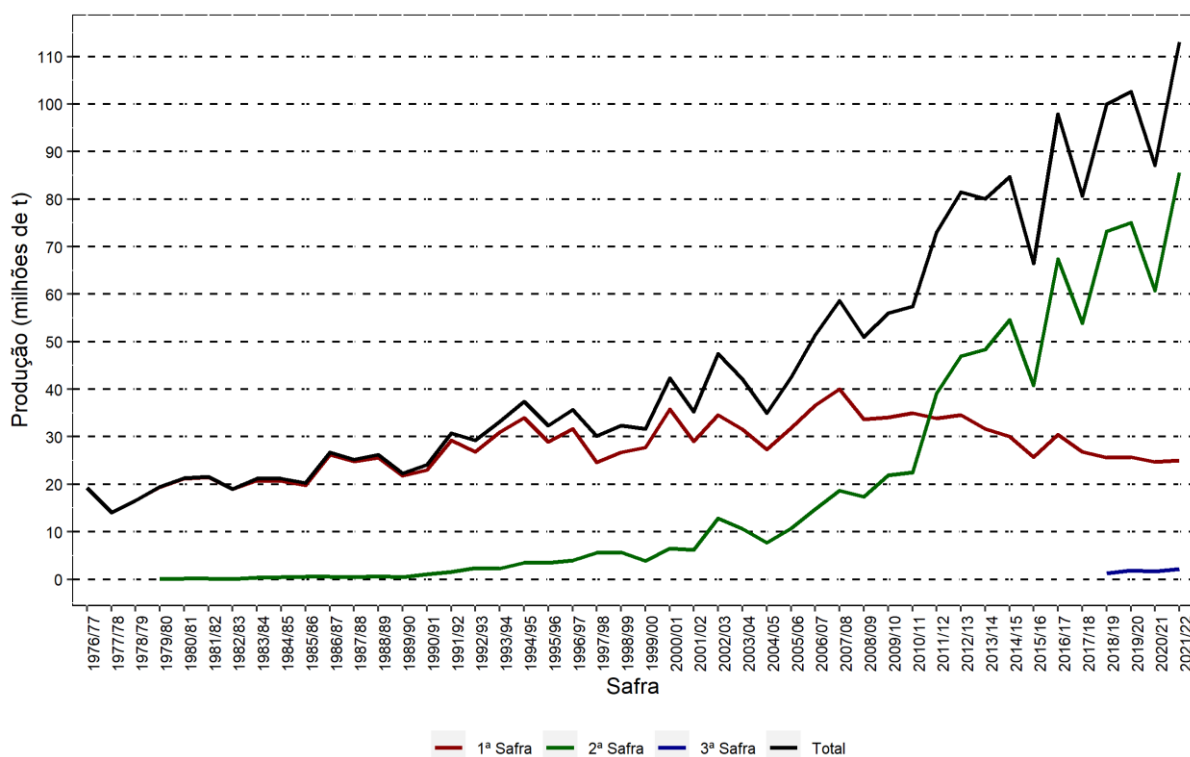


Figura 5: Evolução da produção de milho entre as safras 1976/77 e 2021/22

Fonte: Elaborado com base em CONAB (2023)

O milho de segunda safra era cultivado em áreas restritas e de baixa produtividade, possuindo um potencial produtivo menor do que o milho verão, uma vez que as condições climáticas são menos favoráveis ao desenvolvimento da cultura. Mesmo assim, o milho “safrinha” surgiu como uma cultura alternativa para os produtores. Adicionalmente, o seu cultivo e a sua colheita fora da época convencional proporcionava perspectiva de melhor comercialização do produto, e viabilizou a implementação do SPD (GALVÃO; TROGELLO; PEREIRA, 2015).

O que possibilitou essa forma de cultivo foi o desenvolvimento de cultivares de soja mais precoces; o uso de máquinas e equipamentos mais eficientes; a busca por intensificar o uso do solo e de todo o sistema produtivo; a substituição do milho no cultivo de verão por outras culturas, especialmente a soja; a maior adoção do plantio direto da soja na safra verão; o desenvolvimento de sementes melhoradas e a aprovação de eventos geneticamente modificados comercialmente disponíveis; os melhores preços de comercialização do milho no segundo semestre do ano; o menor custo operacional, quando comparado ao milho verão; e a adoção de melhores práticas de manejo (ALVES et al., 2018; GASQUES et al., 2016; SANCHES; ALVES; BARROS, 2018).

Como evidenciado por Alves et al. (2018), a concorrência por área da primeira safra brasileira é geralmente entre as culturas do milho, do algodão e da soja. Já para a segunda safra, há concorrência entre milho e algodão em algumas regiões e milho e trigo em outras, sendo ainda possível considerar a cultura do sorgo. Dessa forma, pode-se relacionar a redução na área destinada ao milho verão com a expansão da área destinada à cultura da soja, visto sua maior rentabilidade econômica e menor risco climático (ALVES et al., 2018).

A cultura do milho está presente em todos os estados, sendo cultivado tanto por grandes quanto por médio e pequenos produtores, tendo destino comercial e de subsistência. Na Figura 6 é apresentada a participação dos principais estados produtores em cada uma das três safras brasileiras. No ano agrícola, 2021/22, Goiás (GO),



Minas Gerais (MG), Mato Grosso (MT) e Paraná (PR) foram responsáveis por 66,89% da produção nacional. Entretanto, a importância destas regiões sofreu variações ao longo do período analisado, com destaque para os estados do Paraná e do Mato Grosso. O estado do Paraná até a safra 2011/12 era o principal produtor, mas o estado do Mato Grosso aumentou a própria participação total com o avanço da segunda safra.

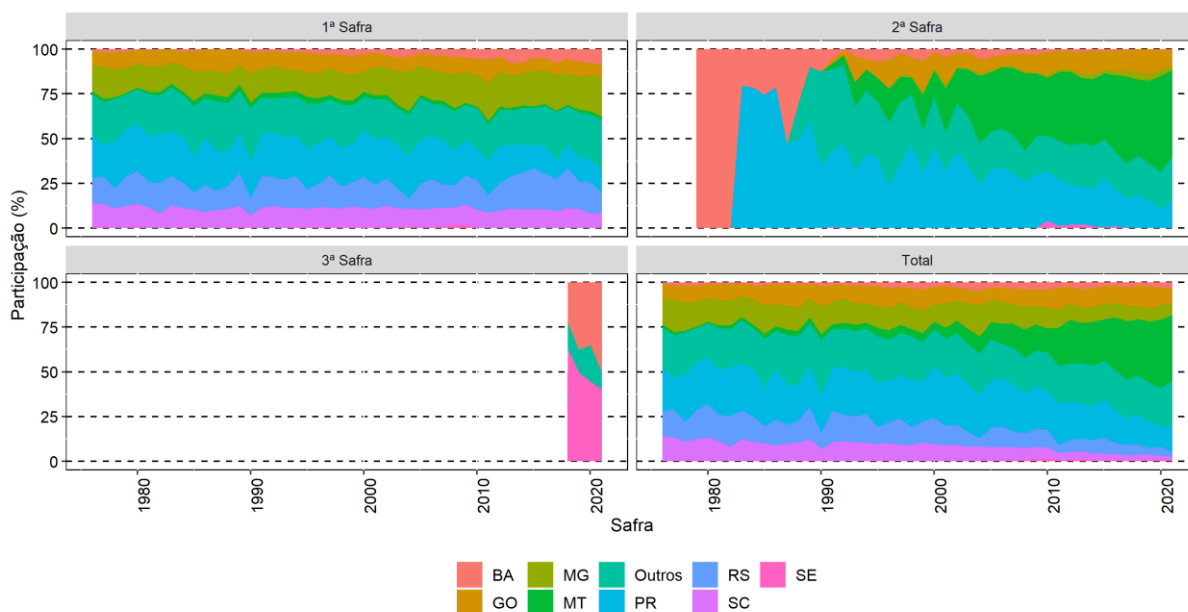


Figura 6: Participação da produção de milho para estados selecionados em cada uma das safras brasileiras  
Fonte: Elaborado com base em CONAB (2023)

Na Figura 6 também pode-se observar a evolução da participação nas diferentes safras de milho. No caso da primeira safra, é notável a importância do estado de Minas Gerais e dos estados da região Sul, que juntos responderam por 54,16% da produção na safra 2021/22. Quanto à segunda safra, destaca-se o crescimento significativo da produção no estado do Mato Grosso, alcançando 48,01% no ano agrícola 2021/22. Por fim, no que diz respeito à terceira safra, os estados da Bahia e do Sergipe se destacam, sendo responsáveis, em média, por 85,85% da produção nacional na safra.

Assim como o volume de produção e a área destinada à cultura, o rendimento médio varia entre as regiões produtoras, o que contribui para o baixo rendimento médio nacional, como pode se observar na Tabela 1. Como evidenciando na Figura 4 e na Figura 5, a partir da safra 2010/2011, a segunda safra passou a ser dominante em termos de área e produção. Na safra 2021/22, enquanto a primeira safra foi responsável por 21,05% da área e por 22,05% da produção, o milho safrinha representou 75,89% da área plantada e 76,03% da quantidade produzida. Adicionalmente, nessa safra mais recente, o rendimento médio do milho segunda safra foi próximo ao do milho primeira safra, sugerindo que a incorporação de tecnologia tem beneficiado a produção do milho “safrinha”. Entretanto, ainda é possível observar uma grande heterogeneidade entre os estados. Em termos de área, apenas os estados do Acre, Amazonas, Maranhão, Piauí, Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul destinaram mais área ao milho primeira safra do que ao milho segunda safra.

Tabela 1: Área, produção e produtividade do milho (1ª, 2ª e 3ª safras) para as diferentes regiões e Unidades da Federação do Brasil na safra 2021/22

	Área (em mil ha)			Rendimento médio (em kg/ha)			Produção (em mil t)		
	1ª Safra	2ª Safra	3ª Safra	1ª Safra	2ª Safra	3ª Safra	1ª Safra	2ª Safra	3ª Safra
Norte	270,40	793,50	16,30	3.529,53	4.507,94	5.596,76	954,40	3.577,10	91,20
RR	0,00	0,00	15,00	0,00	0,00	6.000,00	0,00	0,00	90,00
RO	14,70	239,80	0,00	3.253,00	5.325,80	0,00	47,80	1.277,10	0,00
AC	31,10	8,10	0,00	2.944,00	4.148,00	0,00	91,60	33,60	0,00
AM	9,50	0,00	0,00	2.500,00	0,00	0,00	23,80	0,00	0,00
AP	0,00	0,00	1,30	0,00	0,00	944,00	0,00	0,00	1,20
PA	169,70	220,90	0,00	3.088,00	2.960,00	0,00	524,00	653,90	0,00
TO	45,40	324,70	0,00	5.886,00	4.966,00	0,00	267,20	1.612,50	0,00
Nordeste	1.193,90	1.338,80	644,50	4.801,35	2.161,63	3.228,19	5.732,40	2.894,00	2.080,70
MA	302,50	264,30	0,00	5.090,00	5.171,00	0,00	1.539,70	1.366,70	0,00
PI	451,60	130,00	0,00	4.658,00	4.973,00	0,00	2.103,60	646,50	0,00
CE	0,00	560,80	0,00	0,00	929,00	0,00	0,00	521,00	0,00
RN	0,00	62,40	0,00	0,00	549,00	0,00	0,00	34,30	0,00
PB	0,00	116,10	0,00	0,00	641,00	0,00	0,00	74,40	0,00
PE	0,00	145,20	108,00	0,00	490,00	557,00	0,00	71,10	60,20
AL	0,00	0,00	40,20	0,00	0,00	1.323,00	0,00	0,00	53,20
SE	0,00	0,00	182,10	0,00	0,00	4.940,00	0,00	0,00	899,60
BA	439,80	60,00	314,20	4.750,00	3.000,00	3.398,00	2.089,10	180,00	1.067,70
CO*	276,60	10.436,00	0,00	9.746,61	5.865,93	0,00	2.695,90	61.216,90	0,00
MT	62,10	6.485,30	0,00	8.314,00	6.338,00	0,00	516,30	41.103,80	0,00
MS	18,80	2.160,70	0,00	10.251,00	5.540,00	0,00	192,70	11.970,30	0,00
GO	179,60	1.740,00	0,00	10.205,00	4.547,00	0,00	1.832,80	7.911,80	0,00
DF	16,10	50,00	0,00	9.570,00	4.620,00	0,00	154,10	231,00	0,00
Sudeste	1.189,90	1.092,50	0,00	6.349,36	4.112,63	0,00	7.555,10	4.493,10	0,00
MG	839,60	554,50	0,00	6.566,00	3.893,00	0,00	5.512,80	2.158,70	0,00
ES	13,40	0,00	0,00	2.955,00	0,00	0,00	39,60	0,00	0,00
RJ	1,80	0,00	0,00	3.982,00	0,00	0,00	7,20	0,00	0,00
SP	335,10	538,00	0,00	5.955,00	4.339,00	0,00	1.995,50	2.334,40	0,00
Sul	1.611,70	2.717,80	0,00	4.989,78	5.129,00	0,00	8.041,90	13.939,60	0,00
PR	433,90	2.717,80	0,00	6.904,00	5.129,00	0,00	2.995,60	13.939,60	0,00
SC	353,70	0,00	0,00	6.066,00	0,00	0,00	2.145,50	0,00	0,00
RS	824,10	0,00	0,00	3.520,00	0,00	0,00	2.900,80	0,00	0,00
Brasil	4.542,50	16.378,60	660,80	5.499,12	5.258,12	3.286,61	24.979,70	86.120,60	2.171,80

Fonte: Elaborado com base em CONAB (2023)

Nota: \*Centro-Oeste

## 2.2. Produtividade Total dos Fatores

No contexto da teoria da produção, produtividade total dos fatores refere-se à eficiência com que os fatores de produção como terra, capital e trabalho são combinados e transformados em produtos (bens e serviços). Embora o produto por unidade de insumo configure-se como uma medida de produtividade, no caso de um único

insumo e um único produto, este cálculo se torna mais complexo quando múltiplos insumos são utilizados para produzir o produto, ou até mesmo quando esses insumos são utilizados para produzir múltiplos produtos.

Muitas das vezes, a produtividade é mensurada utilizando-se indicadores de produtividade parcial, como por exemplo produto por unidade de trabalho (ou por horas trabalhadas) ou produto por unidade de terra. Entretanto, apesar da contribuição, esta medida possui uma série de limitações no processo de avaliar o desempenho de firmas, indústrias, produtores rurais ou qualquer outra unidade tomadora de decisão (DMU<sup>7</sup>), visto que podem deturpar e/ou subdimensionar o seu desempenho. No geral, por focarem em insumos específicos, elas fornecem um retrato parcial da produtividade por não considerarem a contribuição conjunta, a complementariedade e a interação de todos os insumos no processo produtivo. Ademais, essas medidas tipicamente não contabilizam fatores externos como mudanças na tecnologia, condições de mercados e políticas governamentais e especificidades do ambiente produtivo, os quais possuem impacto substancial na produtividade.

Dado que no processo produtivo é empregado uma série de fatores de produção, o mais apropriado é considerar a PTF, visto que abrange todos os aspectos do processo produtivo e considera a eficiência conjunta de todos os fatores de produção, capturando interações, complementariedades e sinergias entre eles. Ademais, a PTF incorpora fatores externos que, como mencionado anteriormente, possuem impactos significativos na produtividade.

Segundo Gasques e Conceição (2000) e Messa (2013), este indicador mede o grau de eficiência com que uma DMU combina a totalidade dos fatores de produção para gerar o produto, sendo interpretada como o aumento da produção que não pode ser explicado pela maior utilização dos insumos, mas sim pelos ganhos de produtividade, ou seja, resultado do progresso técnico. Entre os métodos de cômputo mais comuns, destacam-se a decomposição do crescimento, os números-índices e as abordagens dentro do contexto da literatura de eficiência técnica: a Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA) e a Análise de Fronteira Estocástica (*Stochastic Frontier Analysis* - SFA).

A decomposição do crescimento quantifica a contribuição de cada fator de produção e a PTF (obtida residualmente) para o crescimento econômico conforme incorporado à teoria do crescimento econômico de Solow (SOLOW, 1956). A abordagem dos Números Índices envolve a construção de índices de PTF comparando as mudanças no produto com as mudanças nos insumos ao longo do tempo, permitindo a medição das taxas de crescimento da PTF e possibilitando a comparação da produtividade entre as DMUs. Um número índice comumente utilizado na literatura é o índice de Törnqvist, que leva em consideração os preços relativos de insumos e produtos.

Por sua vez, a DEA é uma técnica não paramétrica que mede a eficiência e a produtividade relativa de múltiplas DMUs. Ela compara o desempenho dessas unidades avaliando sua capacidade de converter insumos em produtos com eficiência, fornecendo informações sobre a lacuna de produtividade entre unidades, e identificando as melhores práticas que podem aumentar a produtividade. Um índice comumente utilizado nessa abordagem é o Índice Malmquist. Por fim, a SFA é uma abordagem paramétrica que estima a fronteira de produção e separa o produto observado em dois componentes: a parte determinística (explicada pelos fatores de produção) e a parte estocástica (inexplicável ou componente PTF). A partir da SFA é possível obter uma medida de PTF, e quantificar a contribuição da distância entre a produção real e a produção máxima alcançável com base nos insumos.

Vários estudos foram conduzidos para avaliar a produtividade da agropecuária brasileira. Como destacado por Bragagnolo, Spolador e Barros (2021) e Machado, Bacha e Johnston (2020), de modo geral, têm se evidenciado

---

<sup>7</sup> DMU é o acrônimo de *Decision Making Units*, termo comumente utilizado na literatura sobre análise de eficiência, especialmente, quando se trata da Análise Envoltória de Dados (DEA).

uma tendência de crescimento da PTF da agropecuária brasileira, embora haja diferença nos métodos empregados, nas bases de dados e nos resultados absolutos das estimativas.

Gasques e Conceição (1997) mensuraram a produtividade da agropecuária brasileira tendo como referência o período de 1976 a 1994 e utilizando-se do índice de Törnqvist. Segundo os autores, o índice de produtividade total da agropecuária aumentou 91,56% no período (taxa de crescimento de 3,88% a. a.), explicado pelo crescimento das produtividades do trabalho e terra – 97,21% e 85,98%, respectivamente.

Bonelli e Fonseca (1998), ao avaliarem a PTF para o setor agrícola (lavouras) no período de 1975 a 1996 por meio do método de decomposição do crescimento, evidenciaram um crescimento de 19,33% (0,87% a. a.) - observando taxas de crescimento positivas a partir de 1989. Segundo os autores, o ganho líquido do setor agrícola ocorreu na última década analisada, uma vez que o nível da PTF em 1988 era da mesma ordem de grandeza do observado no início da série.

Fulginiti e Perrin (1998) utilizaram o índice Malmquist para examinar mudanças na produtividade agrícola de 18 países em desenvolvimento no período de 1961 a 1985. De acordo com os autores, pelo menos metade desses países experimentaram redução de produtividade no período sendo que, para o Brasil houve redução de 0,5% - resultado da taxa negativa de progresso técnico (-1,6% a. a.) dado os ganhos observados para eficiência técnica (1,1% a. a.).

Conceição (1998) avaliou a produtividade agrícola no período 1955-1994 utilizando uma função custo. O autor estimou uma taxa de variação da produtividade de 0,809% a. a., sendo a existência de retornos à escala significativos, e a utilização da capacidade produtiva responsáveis pelas variações observadas. Ao considerar o período entre 1975 e 1994, observou-se uma taxa equivalente a 1,97% a. a., reflexo do deslocamento da função custo, da existência de retornos à escala significativos, e da utilização da capacidade produtiva.

Barros (1999) avaliou a produtividade da agropecuária brasileira entre 1975 e 1995 tanto pelo método de decomposição do crescimento quanto pelo índice Törnqvist. Pelo primeiro método, o autor encontrou significativas oscilações anuais da taxa de crescimento da agricultura, com a PTF se elevando 20% no período, experimentando ganhos mais expressivos a partir de meados dos anos 1980. No que se refere ao índice Törnqvist, o autor encontrou um resultado um pouco superior ao método anterior, sendo que os ganhos de produtividade total foram próximos a 35% no período (aproximadamente 1,6% a. a.).

Pereira et al. (2002) e Vicente (2004) avaliaram o crescimento PTF do setor agropecuário brasileiro utilizando o índice Malmquist a partir da abordagem DEA. Segundo Pereira et al. (2002), ao longo do período de 1970 a 1996, os resultados alcançados apontam para progresso técnico e ganhos de produtividade para o setor, apresentando uma taxa anual de crescimento de 4,81%. Para Vicente (2004) houve um crescimento médio de 62% da produtividade no período de 1970-1995, com o progresso técnico, sendo o principal responsável pelos incrementos de produtividade nas regiões de agricultura mais desenvolvidas (Sul e Sudeste), e aumentos de eficiência técnica possuindo efeitos dominantes nas regiões Nordeste e Norte

Embora tenha utilizado o índice Malmquist para mensurar e decompor o crescimento da PTF agropecuária entre 1970 e 1995, Marinho e Carvalho (2004) utilizaram o método SFA para realizar a estimativa – procedimento diferente do adotado por Fulginiti e Perrin (1998), Pereira et al. (2002) e Vicente (2004). Os autores verificaram que a produtividade cresceu cerca de 41% no período analisado, atribuídos unicamente às mudanças tecnológicas, uma vez que os ganhos de eficiência foram pequenos. Seguindo procedimento semelhante, Mendes (2015) observou que a PTF cresceu, em média, 36,40% entre 1970 e 2006, sendo explicada tanto pelo progresso técnico quanto pelos ganhos de eficiência técnica.

Bragagnolo, Spolador e Barros (2010) avaliaram o crescimento da produtividade agrícola brasileira no período 1975-2006 utilizando-se da SFA. Os autores obtiveram uma taxa de crescimento de 3,1% a. a. no período, com o componente progresso técnico assumindo um papel fundamental no crescimento econômico da agricultura brasileira. Para o período mais recente, de 1995 a 2017, Bragagnolo, Spolador e Barros (2021) observaram a continuidade do crescimento da PTF a uma taxa média de 5,32% a. a. explicada pelo uso de diferentes técnicas e tecnologias, que proporcionaram aumento da produção e produtividade agrícola.

Rada e Buccola (2012) avaliaram a PTF da agropecuária brasileira no período entre 1985 e 2006 por meio da SFA. Os autores encontram uma taxa de crescimento anual de 2,62%, explicados exclusivamente pelo progresso técnico – uma vez que observaram taxas negativas para as mudanças na eficiência técnica.

Por meio de números índices e utilizando os dados censitários de 1970, 1975, 1980, 1985, 1995-1996, 2006 e 2017, Gasques et al. (2010) e Gasques et al. (2020) estimaram a PTF agropecuária por meio do índice Tornqvist. Gasques et al. (2010) evidenciaram que a PTF apresentou trajetória crescente nos 36 anos analisados (de 1970 a 2006), com taxa média anual de crescimento de 2,27%, configurando como o principal determinante do crescimento da agricultura brasileira. Recentemente, incorporando os dados do Censo Agropecuário de 2017, Gasques et al. (2020) obtiveram uma taxa anual de crescimento da PTF de 2,03%, com o aumento do produto agropecuário ocorrendo com baixo crescimento da utilização de insumos. Esses resultados mostram que o crescimento da agricultura brasileira tem se dado principalmente com base na produtividade.

Gasques et al. (2004), Gasques, Bastos e Bacchi (2008), Gasques et al. (2012), Gasques et al. (2014), Gasques et al. (2016) e Gasques et al. (2022) também estimaram a PTF agropecuária por meio do índice Tornqvist. Para Gasques et al. (2004), no período de 1975 a 2002, a produtividade cresceu a uma taxa média anual de 3,30%. Gasques, Bastos e Bacchi (2008) observaram uma taxa crescimento de 2,51% no período 1975-2007. Gasques et al. (2012), para o período de 1975 a 2011, evidenciam uma taxa anual de crescimento de 3,56%. De 1975 a 2012, a taxa de crescimento da PTF foi de 3,52% a. a. (GASQUES et al., 2014). Por sua vez, Gasques et al. (2016) estimou uma taxa de crescimento anual da PTF de 3,53%, entre 1975 e 2014, enquanto para Gasques et al. (2022) a PTF no Brasil cresceu cerca de 3,3% ao ano de 1975 a 2020. De modo geral, os diversos trabalhos citados evidenciam que o crescimento do produto agropecuário se deu com base nos ganhos de produtividade, aspecto mais marcante nesse período de 45 anos.

Neste sentido, como mencionado anteriormente, os trabalhos indicam que existe um processo de crescimento da PTF na agropecuária brasileira que vem se intensificando nos últimos anos, independente da metodologia utilizada (Índice de Tornqvist, Índice Malmquist, pela estimação econométrica ou decomposição do crescimento). Entretanto, embora seja possível identificar uma vasta literatura sobre a PTF da agropecuária brasileira, o mesmo não é verdade quando se trata de culturas e/ou atividades específicas.

Na literatura nacional, é possível encontrar poucos estudos que analisam a produtividade, e seus determinantes, de culturas e/ou atividades específicas, seja nos níveis nacional ou regional, como lavouras de amendoim (VICENTE, 2009), indústria sucroalcooleira (DANELON; SPOLADOR; BERGTOLD, 2023), gado de corte (MARTINS; SPOLADOR; NJUKI, 2022), produção de frangos e suínos (YANO, 2020) e cana-de-açúcar e soja para Goiás (SOUZA; TEIXEIRA, 2014). Para o caso específico da cultura do milho, objeto de estudo da presente pesquisa, tem-se os trabalhos de Souza e Teixeira (2014) que avaliaram a produtividade da produção do grão em Goiás entre 1985 e 2006, e Turra (2019) que analisou a produtividade de produção de milho no estado do Paraná entre 2009 e 2016.

### 3. METODOLOGIA

Como mencionado anteriormente, a produtividade pode ser medida de diversas formas. No presente estudo, utiliza-se como medida de análise a PTF, uma medida da eficiência com que os insumos (como capital e trabalho) são usados para produzir o produto – milho em grão nesta pesquisa. Assim, a PTF captura a parcela do crescimento da produção que não é explicada pelos aumentos da quantidade empregada de insumos na produção.

A medição da PTF é importante porque fornece informações sobre a eficiência da alocação de recursos e o progresso técnico, sendo que o seu aumento PTF indica que mais produção está sendo produzida com o mesmo nível de insumos, o que pode contribuir para o crescimento econômico e padrões de vida mais elevados (O'DONNELL, 2018).

Como abordado por O'Donnell (2018) e Machado, Bacha e Johnston (2020), um dos métodos comumente utilizados na medição da PTF são os métodos econométricos, especificamente a Análise de Fronteira Estocástica (SFA). A SFA combina, por exemplo, uma função de produção com um modelo estatístico de ineficiência para estimar a produção máxima que poderia ser obtida dadas as quantidades de insumos utilizadas. No geral, trata-se de uma abordagem que auxilia na avaliação do desempenho de produtores de milho e identificação de áreas potenciais de melhoria.

#### 3.1. Análise de Fronteira Estocástica

A SFA, proposta simultaneamente por Aigner, Lovell e Schmidt (1977) e Meeusen e van den Broeck (1977), consiste em um método estatístico utilizado para a estimação e análise da eficiência produtiva na presença de fatores aleatórios e ineficiências, permitindo a avaliação do desempenho de uma DMU em relação ao seu potencial máximo, sugerindo que nem todas as unidades são sempre bem sucedidas em solucionar os problemas de otimização (por exemplo, maximizar a produção dado as dotações dos fatores de produção e a tecnologia). Basicamente, os fatores aleatórios representam influências externas além do controle da DMU, enquanto as ineficiências capturam fatores internos, como decisões administrativas, que levam a um desempenho abaixo do ótimo (KUMBHAKAR; LOVELL, 2000).

O modelo pode expresso por:

$$\ln q_{it} = f^t(x_{it}, q_{it}) + v_{it} - u_{it}, \quad i = 1, \dots, I \quad (01)$$

onde  $q_i$  é o escalar do produto do produtor  $i$  no tempo  $t$ ;  $x_i$  é o vetor dos fatores de produção (ou insumos) utilizados pelo produtor  $i$  no tempo  $t$ ;  $\beta$  é o vetor de parâmetros desconhecidos a serem estimados;  $v$  é o primeiro componente do erro que busca capturar os efeitos de ruídos estatísticos, com  $v_i \sim iidN(0, \sigma_v^2)$ ; e  $u_i$  ( $u_i \geq 0$ ) é o segundo componente do erro que busca capturar os efeitos da ineficiência técnica, com  $u_i \sim iidN^+(0, \sigma_u^2)$ <sup>8</sup> (KUMBHAKAR; LOVELL, 2000). A eficiência técnica é definida como a razão entre o produto observado e o produto potencial.

Esta abordagem requer a especificação de uma forma funcional da fronteira de produção, optando-se por especificar a forma log-linear da função Cobb-Douglas como a fronteira de produção no presente estudo. Esta

---

<sup>8</sup> Embora as premissas de distribuição (*half-formal, truncated normal* etc.) gerem diferentes predições da eficiência técnica, Kumbhakar e Lovell (2000) e Coelli et al. (2005) destacaram que a escolha não afeta o ranking da eficiência, e que as elasticidades estimadas e os efeitos da mudança tecnológica são robustos às mudanças das distribuições.

função é amplamente utilizada em estudos aplicados à agropecuária, demonstrando uma capacidade satisfatória de explicar a dinâmica desse setor e suas atividades. Ademais, esta tecnologia satisfaz globalmente as condições de monotonicidade e a quasiconcavidade oriundas da teoria econômica da produção, que são particularmente relevantes na mensuração da PTF (O'DONNELL, 2016, 2018).

Além disso, a função Cobb-Douglas oferece outras vantagens, como a possibilidade de obter as elasticidades de produção diretamente a partir dos parâmetros da função; a soma dos coeficientes estimados também representa os rendimentos à escala, graças à sua propriedade de homogeneidade; e possui um número menor de parâmetros a serem estimados em comparação com outras formas funcionais (KUMBHAKAR; WANG; HORNCastle, 2015; VARIAN, 2010). A forma genérica da função Cobb-Douglas é definida com:

$$\ln q_{it} = \ln f^t(x_{it}; \beta) + v_{it} - u_{it}, \quad i = 1, \dots, I \quad (02)$$

A eficiência técnica passa a ser definida como:

$$TE_i = \frac{q_{it}}{\exp(x_{it}; \beta) \exp \{v_{it}\}} = \exp(-u_{it}) \quad (03)$$

Destaca-se que para a utilização desta abordagem, o primeiro passo é a verificação de assimetria negativa nos resíduos da estimação por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO)<sup>9</sup> e da existência de ineficiência técnica por meio dos testes propostos por D'agostino, Belanger e D'agostino Jr. (1990) e Coelli (1995). O teste sugerido por D'agostino, Belanger e D'agostino Jr. (1990) tem por hipótese nula que os resíduos do modelo estimado por MQO não apresentam assimetria negativa, ou seja, há indícios que o modelo não apresenta ineficiência ( $u_i = 0$ ). Por sua vez, o teste estabelecido por Coelli (1995) tem por hipótese nula a não existência de assimetria, implicando que o modelo estimado por MQO seria apropriado, visto a não existência de indícios da ineficiência técnica.

Constatada da existência de ineficiência técnica, no segundo passo, procede-se com a estimação do modelo de fronteira estocástica utilizando o método de Máxima Verossimilhança em etapa única utilizando o código fornecido por Kumbhakar, Wang e Horncastle (2015). Por fim, após a estimação, realiza-se o Teste de Razão de Verossimilhança (LR) conforme:

$$-2[L(H_0) - L(H_1)] \quad (04)$$

onde  $L(H_0)$  é o logaritmo do valor de verossimilhança do modelo restrito (MQO) e  $L(H_1)$  é o logaritmo do valor de verossimilhança do modelo irrestrito (SFA). A rejeição da hipótese nula do teste evidencia que a SFA é preferível ao modelo estimado por MQO dado a existência de ineficiência técnica. Este teste se faz necessário visto que os resultados do modelo estimado por Máxima Verossimilhança são dependentes da distribuição adotada para  $u_i$  e os testes mencionados anteriormente não consideram esta especificação em sua elaboração (KUMBHAKAR; WANG; HORNCastle, 2015).

### 3.2. Análise de produtividade

Tendo como base O'Donnell (2012, 2018), a PTF da firma  $i$  no período  $t$  é definida como:

$$PTF_{it} = \frac{QI(q_{it})}{XI(x_{it})} \quad (05)$$

<sup>9</sup> A estimação por MQO gera coeficientes de inclinação consistentes, mas um coeficiente de intercepto viesado (KUMBHAKAR; WANG; HORNCastle, 2015).

onde  $QI(q_{it})$  e  $XI(x_{it})$  são quaisquer índices do produto e dos insumos. O índice referente à PTF utilizado nesta pesquisa é um índice multiplicativo, construído por meio de funções agregadoras que assumem a forma  $QI(q_{it}) \propto \prod_{n=1}^N q_{nks}^{a_n}$  e  $XI(x_{it}) \propto \prod_{m=1}^M x_{mks}^{b_m}$  onde  $a_1, \dots, a_N$  e  $b_1, \dots, b_M$  são pesos não negativos que somam 1.

Para o caso de um único produto, como no presente estudo, a eq. (05) pode ser escrita como:

$$PTF_{it} = \frac{q_{it}}{XI(x_{it})} \quad (06)$$

Índices de produtividade são medidas de mudança na produtividade, assim, utiliza-se um índice que compara a PTF da firma  $i$  no período  $t$  com a PTF da firma  $k$  no período  $s$ , definido como:

$$IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) = \frac{TFP(q_{it}, x_{it})}{TFP(q_{ks}, x_{ks})} \quad (07)$$

Definindo a eq. (06) para a firma  $k$  no período  $s$ , pode-se reescrever (07) como:

$$\begin{aligned} IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) &= \frac{q_{it}}{XI(x_{it})} \frac{XI(x_{ks})}{q_{ks}} \\ &= \frac{q_{it}}{\prod_{m=1}^M x_{mit}^{b_m}} \frac{\prod_{m=1}^M x_{mks}^{b_m}}{q_{ks}} \\ &= \frac{q_{it}}{q_{ks}} \prod_{m=1}^M \left( \frac{x_{mks}}{x_{mit}} \right)^{b_m} \end{aligned} \quad (08)$$

Segundo Njuki, Bravo-Ureta e O'Donnell (2019), quaisquer pesos não negativos invariantes de observação que somem 1 podem ser utilizados para fins de cálculo deste índice. Nesta pesquisa, considera-se  $b_m = \frac{\hat{\beta}_m}{\sum_{m=1}^M \hat{\beta}_m}$  onde  $\hat{\beta}_m$  é um estimador de  $\beta_m$  (oriundo do modelo SFA).

Como mencionado por O'Donnell (2018), a análise de produtividade envolve medir e explicar as mudanças na PTF. Assim, para implementar uma decomposição orientada para o produto, tem-se um  $IPTF$  que leve em conta várias fontes de crescimento da produtividade (eficiência técnica, eficiência de escala, eficiência relacionada ao ambiente de produção etc.) utilizando-se o modelo definido pela eq. (01).

Aplicando antilogaritmo na eq. (01), ela pode ser reescrita como:

$$1 = q_{it}^{-1} \exp(f^t(x_{it}, q_{it})) \exp(-u_{it}) \exp(v_{it}) \quad (09)$$

Multiplicando ambos os lados da eq. (09) por  $PTF(q_{it}, x_{it})$ , tem-se:

$$PTF(q_{it}, x_{it}) = [PTF(q_{it}, x_{it}) q_{it}^{-1} \exp(f^t(x_{it}, q_{it}))] \exp(-u_{it}) \exp(v_{it}) \quad (10)$$

Equação similar para a firma  $k$  no período  $s$ :

$$PTF(q_{ks}, x_{ks}) = [PTF(q_{ks}, x_{ks}) q_{ks}^{-1} \exp(f^s(x_{ks}, q_{ks}))] \exp(-u_{ks}) \exp(v_{ks}) \quad (11)$$

Substituindo as eq. (10) e (11) em (07), tem-se:

$$IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) = \frac{[PTF(q_{it}, x_{it}) q_{it}^{-1} \exp(f^t(x_{it}, q_{it}))] \exp(-u_{it}) \exp(v_{it})}{[PTF(q_{ks}, x_{ks}) q_{ks}^{-1} \exp(f^s(x_{ks}, q_{ks}))] \exp(-u_{ks}) \exp(v_{ks})} \quad (12)$$



Reorganizando (12), tem-se:

$$IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) = \left[ IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) \frac{q_{it}^{-1} \exp(f^t(x_{it}, q_{it}))}{q_{ks}^{-1} \exp(f^s(x_{ks}, q_{ks}))} \right] \left[ \frac{\exp(-u_{it})}{\exp(-u_{ks})} \right] \left[ \frac{\exp(v_{it})}{\exp(v_{ks})} \right] \quad (13)$$

Utilizando eq. (08), pode-se reescrever (13) como:

$$IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) = \underbrace{\left[ \prod_{m=1}^M \left( \frac{x_{mit}}{x_{mks}} \right)^{-b_m} \frac{\exp(f^t(x_{it}, q_{it}))}{\exp(f^s(x_{ks}, q_{ks}))} \right]}_{OETSMEI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(-u_{it})}{\exp(-u_{ks})} \right]}_{OTEI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(v_{it})}{\exp(v_{ks})} \right]}_{SNI} \quad (14)$$

onde *OETSMEI* é um índice de ambiente, tecnologia e de eficiência de escala orientado ao produto, que captura flutuações na PTF devido à variações em fatores do ambiente produtivo, na tecnologia e nas economias de escala e substituição; *OTEI* é um índice de eficiência orientado a produto, que mede diferenças na habilidade das DMUs em maximizarem a produção dado os nível de insumo; e *SNI* é um índice de ruído estatístico, que contabiliza erros de forma funcional, erros de medição e erros de variáveis omitidas e incluídas.

### 3.3. Base de dados e variáveis incluídas no modelo empírico

Este estudo utilizou informações dos estabelecimentos produtores de milho dos Censos Agropecuários de 1995/96, 2006 e 2017<sup>10</sup>, reunindo informações ao nível de estabelecimentos agropecuários das produções e utilizações de fatores de produção pela agricultura, pecuária e agroindústria e demais características dos produtores e estabelecimentos.

No presente estudo o foco se recaí sobre os estabelecimentos produtores de milho, caracterizando o primeiro recorte realizado. As variáveis consideradas foram: Valor da produção de milho; Quantidade produzida de milho; Área colhida de milho; População ocupada; Despesa agrícola, Despesa com contratação de serviços de empreitada; Número de tratores; Número de implementos agrícolas (colheitadeira, plantadeira e adubadeira); Capacidade de armazenagem; Utilização de assistência técnica; Participação de cooperativas e/ou entidades de classe e associações; Adoção das práticas agrícolas como plantio direto e rotação de cultura; e Principal atividade econômica do estabelecimento.

Os Censos Agropecuários levantaram informações sobre o número de pessoas ocupadas no estabelecimento, entretanto, optou-se por utilizar a quantidade de trabalho utilizada em equivalente-homem (EHT), estratégia adotada anteriormente por Felema e Spolador (2022, 2023). Basicamente, o cálculo consiste em adicionar as despesas com serviços de empreitada ao contingente ocupado no estabelecimento (que contabiliza o responsável e membros não remunerados da família, empregados permanentes e temporários, parceiros e outra condição). Para isso se faz necessário calcular o número de equivalente-homem com serviços de empreitada, conforme:

$$SEEH = \left( \frac{SE}{VD} \right) / 300 \quad (15)$$

onde *SEEH* consiste no número de equivalente-homem com serviços de empreitada; *SE* é a despesa com serviços de empreitada; e *VD* é o valor médio da diária. Para obter o valor médio da diária, utilizou-se os dados referentes aos Preços Agropecuários - Remuneração do Trabalho Agrícola da Fundação Getúlio Vargas (FGV) para todos os

<sup>10</sup> Os dados foram coletados e tratados na Sala de Acesso Restrito (SAR) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

estados brasileiros durante os períodos de 1995/1996 e 2006. Para o ano de 2017, recorreu-se à base de dados do Instituto de Economia Agrícola (IEA), que fornece o preço médio da diária específico para o estado de São Paulo, e aplicou-se as diferenças médias das diárias pagas entre os demais estados e São Paulo nos períodos de 1995/1996 e 2006 no referido ano (FELEMA; SPOLADOR, 2022).

A sensibilidade da produtividade agrícola em face de variação climática está bem documentada na literatura, sendo que variáveis climáticas como precipitação, temperatura e umidade podem impactar significativamente a produtividade agrícola. Assim, se faz necessário considerar variáveis climáticas para avaliar com precisão o desempenho da cultura. No presente estudo foram utilizadas as variáveis temperatura (graus Celsius (°C)) e precipitação (milímetro) do banco de dados disponibilizado pelo grupo *Terrestrial Hydrology Research Group* (THRG) da Universidade de Princeton, seguindo os procedimentos descritos por Sheffield, Goteti e Wood (2006) e Xavier, King e Scanlon (2016).

A base de dados contém informações ao nível municipal de temperatura média mensal e precipitação mensal acumulada para o período de janeiro de 1948 a dezembro de 2016, entretanto, utilizou-se apenas informações a partir de 1980. Para a compatibilização com as informações dos Censos Agropecuários, usando os valores mensais, calculou-se as médias anuais das variáveis para o período selecionado, sendo utilizado para o Censo Agropecuário de 1995/96 as médias observadas entre os anos de 1995 e 1996, para o Censo Agropecuário de 2006 as médias observadas entre os anos de 2005 e 2006 e, por fim, para o Censo Agropecuário de 2017 as médias observadas em 2016 (dada a disponibilidade do dado).

Além disso, com o objetivo de capturar as flutuações/variações climáticas, foram utilizadas as variáveis de anomalia de temperatura e anomalia de precipitação, que representam o desvio de cada observação anual em relação à média de longo prazo (1980-2016), como indicado por Barrios, Bertinelli e Strobl (2010), Lachaud e Bravo-Ureta (2021) e Lachaud, Bravo-Ureta e Ludena (2017, 2022).

De posse dessas informações, gerou-se duas bases de dados. Na primeira base, optou-se por não realizar tratamentos e considerar as informações como elas foram reportadas pelo IBGE, sendo utilizada para caracterizar a produção de milho sob a perspectiva dos Censos Agropecuários. Na segunda base foram realizados alguns tratamentos com o intuito de tornar as informações propícias para realizar a análise e as estimativas. Nela se excluiu produtores sem área colhida, sem quantidade produzida e/ou sem valor da produção de milho. Adicionalmente, optou-se por remover produtores sem área total e/ou de lavoura temporária e produtores sem valor da produção total e/ou da lavoura temporária. Após essa exclusão, construiu-se uma variável percentil da produtividade a nível Brasil e outra ao nível de Unidade da Federação (UF), excluindo produtores fora dos percentis 3 a 99 ao nível nacional e/ou fora dos percentis 6 a 95 ao nível de cada UF. Por fim, excluiu-se produtores sem despesa agrícola, com menos de uma unidade de EHT e que não tinha informações das variáveis climáticas utilizadas. A Tabela 2 apresenta uma descrição das variáveis incluídas no estudo.

Tabela 2: Descrição das variáveis utilizadas no estudo

Variável	Unidade de medida*	Descrição
Valor da produção	R\$ de 2017	Valor da produção de milho
Quantidade produzida	Quilograma	Quantidade produzida de milho
Área colhida	Hectare	Área colhida de milho
População ocupada	Unidade	Número de trabalhadores familiares e contratados
Equivalente Homem Total	Unidade	Número de trabalhadores familiares e contratados e número de equivalente-homem com serviços de empreitada
Tratores	Unidade	Número de tratores
Implementos agrícolas	Unidade	Número de colheitadeiras, plantadeiras e adubadeiras
Despesa agrícola	R\$ de 2017	Valor gasto com arrendamento de terras de terceiros; com adubos e corretivos; com agrotóxicos; com sementes; com transporte da produção; com energia elétrica; e com combustíveis e lubrificantes
Armazém	<i>Dummy</i>	<i>Dummy</i> que recebe o valor 1 caso o estabelecimento tenha alguma capacidade de armazenagem de grão e 0 caso contrário
Cooperativa	<i>Dummy</i>	<i>Dummy</i> que recebe o valor 1 caso o estabelecimento tenha participação em cooperativas e/ou em alguma entidade de classe ou associação e 0 caso contrário
Assistência técnica	<i>Dummy</i>	<i>Dummy</i> que recebe o valor 1 caso o estabelecimento tenha acesso à assistência técnica e 0 caso contrário
Atividade principal	<i>Dummy</i>	<i>Dummy</i> que recebe o valor 1 caso o estabelecimento tenha a cultura do milho como atividade principal e 0 caso contrário
Plantio direto**	<i>Dummy</i>	<i>Dummy</i> que recebe o valor 1 caso o estabelecimento adote o plantio direto e 0 caso contrário
Rotação de cultura**	<i>Dummy</i>	<i>Dummy</i> que recebe o valor 1 caso o estabelecimento adote a rotação de culturas e 0 caso contrário
Temperatura	°C	Temperatura média anual
Precipitação	Milímetro	Precipitação acumula média
Anomalia de temperatura	°C	Desvio de cada observação anual em relação à média de longo prazo (1980-2016)
Anomalia de precipitação	Milímetro	Desvio de cada observação anual em relação à média de longo prazo (1980-2016)

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*os valores monetários foram deflacionados pelo Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna (IGP-DI) (12/2017 = 100) (FGV, 2022); \*\*variáveis apuradas apenas nos Censos Agropecuário de 2006 e 2017

### 3.4. Estratégia empírica

Visando alcançar os objetivos propostos e os procedimentos abordados nas seções anteriores, dividiu-se o estudo em três etapas. Na primeira etapa, buscou-se caracterizar a produção de milho no Brasil segundo os Censos Agropecuários. Na segunda, avaliou-se a eficiência e a produtividade dos produtores de milho considerando os três últimos Censos. Por fim, na terceira etapa, o foco foi a adoção das práticas agrícolas conservacionistas, considerando-se os Censos Agropecuários de 2006 e 2017. Destaca-se que na primeira etapa utilizou-se a base de dados sem tratamento.

Como mencionado anteriormente, optou-se por utilizar a função de produção Cobb-Douglas. Assim, adaptando a eq. (02) à problemática da segunda etapa (modelo 1), tem-se:

$$\begin{aligned}
 f^t(x_{it}, q_{it}) = & \beta_0 + \lambda t + \beta_1 \ln x_{1it} + \beta_2 \ln x_{2it} + \beta_3 \ln x_{3it} + \beta_4 \ln x_{4it}^* + \beta_5 D_{4i} + \beta_6 Z_{1i} + \beta_7 Z_{2i} + \beta_8 Z_{3i} \\
 & + \beta_9 Z_{4i} + \beta_{10} SE_i + \beta_{11} S_i + \beta_{12} CO_i + \beta_{13} GA_{1i} + \beta_{14} GA_{2i} + \beta_{15} \ln Temp_{it} \\
 & + \beta_{16} ATemp_{it} + \beta_{17} \ln Prec_{it} + \beta_{18} APrec_{it} + v_{it} - u_{it}
 \end{aligned} \quad (16)$$

onde  $q_{it}$  é a quantidade produzida de milho;  $t$  é uma tendência temporal, assumindo valor 1 para o ano de 1995/96, 2 para 2006 e 3 para 2017;  $x_{1it}$  é a área colhida de milho;  $x_{2it}$  é número de EHT;  $x_{3it}$  é a despesa agrícola;  $x_{4it}$  é uma variável composta pelo número de tratores e implementos agrícolas (plantadeiras, adubadeiras e colheitadeiras) utilizada como *proxy* para capital;  $Z_{1i}$  é a variável *dummy* que identifica se o estabelecimento possui alguma capacidade armazenagem de grãos;  $Z_{2i}$  é a variável *dummy* que identifica se o estabelecimento participa de alguma cooperativa, entidade de classe e/ou associação;  $Z_{3i}$  é a variável *dummy* que identifica se o estabelecimento teve acesso à assistência técnica;  $Z_{4i}$  é a variável *dummy* que identifica se o estabelecimento possui o milho como atividade principal;  $Temp_{it}$  é temperatura média no ano;  $Prec_{it}$  é a precipitação média no ano;  $ATemp_{it}$  é a anomalia da temperatura;  $APrec_{it}$  é anomalia da precipitação;  $GA_{1i}$  é a variável *dummy* que identifica se o estabelecimento colheu

entre 10 ha e 50 ([10-50ha) - produtores com menos de 10 ha de área colhida como base);  $GA_{2it}$  é a variável *dummy* que identifica se o estabelecimento colheu 50 ha ou mais ([50-∞ha) - produtores com menos de 10 ha de área colhida como base); e  $SE_i$ ,  $S_i$  e  $CO_i$  são variáveis *dummies* que identificam se o estabelecimento é da região Sudeste, Sul e Centro-Oeste, respectivamente (com as regiões Norte-Nordeste como base). Como menos 15,5% dos estabelecimentos analisados em cada um dos Censos Agropecuários possuem tratores e/ou implementos agrícolas ( $x_{4it}$ ), adotou-se o procedimento proposto por Battese (1997), onde  $D_{4i} = 1$  se  $x_{4it} = 0$ ,  $D_{1i} = 0$  se  $x_{4it} > 0$  e  $x_{4it}^* = \max(x_{4it}, D_{1i})$ . A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na estimativa do modelo 1.

Tabela 3: Estatística descritiva das variáveis utilizadas no modelo de fronteira estocástica (modelo 1)

Variável	Média	Desvio padrão	p25	p50	p75
Quantidade	26.021,54	509967,34	300	1.100	4.800
Área	6,66	92,50	0,58	1,21	3,00
Trabalho	3,58	8,72	2	3	4
Capital	1,23	3,90	1	1	1
Despesa	22.214,02	942717,38	416,05	1.146,00	4.664,27
Temperatura	24,12	3,05	21,26	25,03	26,86
Precipitação	105,38	44,72	62,49	106,51	143,76
Anomalia temperatura	15,17	10,68	0,62	20,31	23,98
Anomalia precipitação	74,34	63,34	0,42	69,96	128,30
	= 0			= 1	
<i>Dummy</i> Capital		13,15%			86,85%
Sudeste		87,67%			12,33%
Sul		71,01%			28,99%
Centro-Oeste		97,20%			2,79%
Grupo de área 1		94,91%			5,07%
Grupo de área 2		98,46%			1,52%
Armazém		82,23%			17,76%
Cooperativa		64,89%			35,09%
Assistência técnica		76,52%			23,48%
Atividade principal		82,85%			17,15%
Número de observações			4.815.637		

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando a eq. (16), pode-se redefinir a eq. (15) como:

$$\begin{aligned}
 IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) &= \frac{\exp(\lambda t)}{\exp(\lambda s)} \left[ \frac{\text{Temp}_{it}^{\beta_{15}} \text{Prec}_{it}^{\beta_{17}} \exp(\beta_{16} A \text{Temp}_{it}) \exp(\beta_{18} A \text{Prec}_{it})}{\text{Temp}_{ks}^{\beta_{15}} \text{Prec}_{ks}^{\beta_{17}} \exp(\beta_{16} A \text{Temp}_{ks}) \exp(\beta_{18} A \text{Prec}_{ks})} \right] \\
 &\quad \frac{\exp(\beta_4 D_{4i}) \exp(\beta_6 Z_{1it}) \exp(\beta_7 Z_{2it}) \exp(\beta_8 Z_{3it}) \exp(\beta_9 Z_{4it}) \exp(\beta_{11} S_i) \exp(\beta_{12} CO_i) \exp(\beta_{13} GA_{1i}) \exp(\beta_{14} GA_{2i})}{\exp(\beta_4 D_{4k}) \exp(\beta_6 Z_{1ks}) \exp(\beta_7 Z_{2ks}) \exp(\beta_8 Z_{3ks}) \exp(\beta_9 Z_{4ks}) \exp(\beta_{11} S_k) \exp(\beta_{12} CO_k) \exp(\beta_{13} GA_{1k}) \exp(\beta_{14} GA_{2k})} \\
 &\quad \left[ \left( \frac{x_{1it}^{\beta_1} x_{2it}^{\beta_2} x_{3it}^{\beta_3} x_{4it}^{\beta_4}}{x_{1ks}^{\beta_1} x_{2ks}^{\beta_2} x_{3ks}^{\beta_3} x_{4ks}^{\beta_4}} \right)^{1 - \frac{1}{(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4)}} \right] \frac{\exp(-u_{it})}{\exp(-u_{ks})} \frac{\exp(v_{it})}{\exp(v_{ks})} \quad (17)
 \end{aligned}$$

A eq. (17) ilustra como o *IPTF* é decomposto com o propósito de identificar diversas fontes de crescimento da produtividade. Essas fontes incluem o índice de tecnologia ou progresso técnico (*OTI*), que reflete o

crescimento da produtividade relacionado à introdução de novos sistemas e métodos no processo de produção; o índice ambiental (*OEI*), que captura o crescimento da produtividade associado a características do ambiente de produção; o índice de eficiência de escala (*OSEI*), que mede os ganhos ou perdas de produtividade relacionados às economias de escala; o índice climático (*OCI*), que considera as flutuações na produtividade causadas por variações na temperatura e precipitação; o índice de eficiência técnica (*OTEI*), que representa o crescimento da produtividade relacionado aos movimentos em direção à fronteira de produção; e o índice estatístico de ruído (*SNI*), que reflete as flutuações na produtividade devido a fatores não identificáveis.

Adaptando a eq. (02) à problemática da terceira etapa (modelo 2), tem-se:

$$f^t(x_{it}, q_{it}) = \beta_0 + \lambda t + \beta_1 \ln x_{1it} + \beta_2 \ln x_{2it} + \beta_3 \ln x_{3it} + \beta_4 \ln x_{4it}^* + \beta_5 D_{4i} + \beta_6 Z_{1i} + \beta_7 Z_{2i} + \beta_8 Z_{3i} \\ + \beta_9 Z_{4i} + \beta_{10} SE_i + \beta_{11} S_i + \beta_{12} CO_i + \beta_{13} GA_{1i} + \beta_{14} GA_{2i} + \beta_{15} \ln Temp_{it} \\ + \beta_{16} ATemp_{it} + \beta_{17} \ln Prec_{it} + \beta_{18} APrec_{it} + \beta_{19} Z_{5i} + \beta_{20} Z_{6i} + v_{it} - u_{it} \quad (18)$$

onde  $t$  é uma tendência temporal, assumindo valor 1 para o ano de 2006 e 2 para 2017;  $x_{3it}$  é a despesa agrícola desconsiderando as despesas com combustíveis e lubrificantes;  $x_{4it}$  é despesa com combustíveis e lubrificantes utilizada como *proxy* para capital<sup>11</sup>;  $Z_{5i}$  é a variável *dummy* que identifica se o estabelecimento adotou o plantio direto;  $Z_{6i}$  é a variável *dummy* que identifica se o estabelecimento adotou a rotação de culturas; as demais variáveis são as mesmas descritas na eq. (16). Aqui também se adotou o procedimento proposto por Battese (1997), onde  $D_{4i} = 1$  se  $x_{4it} = 0$ ,  $D_{1i} = 0$  se  $x_{4it} > 0$  e  $x_{4it}^* = \max(x_{4it}, D_{1i})$ . Na Tabela 4, apresenta-se as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na estimativa do modelo 2.

Considerando a eq. (18), pode-se redefinir a eq. (15) como:

$$IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) = \underbrace{\frac{\exp(\lambda t)}{\exp(\lambda s)}}_{OTI} \underbrace{\left[ \frac{Temp_{it}^{\beta_{15}} Prec_{it}^{\beta_{17}} \exp(\beta_{16} ATemp_{it}) \exp(\beta_{18} APrec_{it})}{Temp_{ks}^{\beta_{15}} Prec_{ks}^{\beta_{17}} \exp(\beta_{16} ATemp_{ks}) \exp(\beta_{18} APrec_{ks})} \right]}_{OCI} \\ \underbrace{\left[ \frac{\exp(\beta_{19} Z_{5it}) \exp(\beta_{20} Z_{6it})}{\exp(\beta_{19} Z_{5ks}) \exp(\beta_{20} Z_{6ks})} \right]}_{OPI} \\ \underbrace{\left[ \frac{\exp(\beta_4 D_{4i}) \exp(\beta_6 Z_{1it}) \exp(\beta_7 Z_{2it}) \exp(\beta_8 Z_{3it}) \exp(\beta_9 Z_{4it}) \exp(\beta_{11} S_i) \exp(\beta_{12} CO_i) \exp(\beta_{13} GA_{1i}) \exp(\beta_{14} GA_{2i})}{\exp(\beta_4 D_{4k}) \exp(\beta_6 Z_{1ks}) \exp(\beta_7 Z_{2ks}) \exp(\beta_8 Z_{3ks}) \exp(\beta_9 Z_{4ks}) \exp(\beta_{11} S_k) \exp(\beta_{12} CO_k) \exp(\beta_{13} GA_{1k}) \exp(\beta_{14} GA_{2k})} \right]}_{OEI} \\ \underbrace{\left( \frac{x_{1it}^{\beta_1} x_{2it}^{\beta_2} x_{3it}^{\beta_3} x_{4it}^{\beta_4}}{x_{1ks}^{\beta_1} x_{2ks}^{\beta_2} x_{3ks}^{\beta_3} x_{4ks}^{\beta_4}} \right)^{1 - \frac{1}{(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4)}}}_{OSEI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(-u_{it})}{\exp(-u_{ks})} \right]}_{OTEI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(v_{it})}{\exp(v_{ks})} \right]}_{SNI} \quad (19)$$

Assim como na eq. (17), a eq. (19) mostra como o *IPTF* pode ser decomposto com o propósito de identificar diversas fontes de crescimento da produtividade como índice de tecnologia / progresso técnico (*OTI*); o índice ambiental (*OEI*); o índice de eficiência de escala (*OSEI*); o índice climático (*OCI*); o índice de eficiência técnica (*OTEI*); e o índice estatístico de ruído (*SNI*), definidos anteriormente. Além desses índices, o *IPTF* também incorpora o índice de práticas agrícolas (*OPI*), que captura o crescimento da produtividade associado à adoção das práticas agrícolas plantio direto e rotação de culturas.

<sup>11</sup> Uma abordagem alternativa é utilizar o valor dos serviços do capital como *proxy* para a variável capital. No entanto, a obtenção e disponibilidade dessas informações tornam essa utilização desafiadora. Assim, como no modelo 1, inicialmente considerou-se a quantidade de tratores e implementos agrícolas como *proxy* para o capital. No entanto, essas estimativas violaram alguns pressupostos da função de produção, como a monotonicidade. Portanto, optou-se por considerar as despesas com combustíveis e lubrificantes, pois essa medida se aproxima do capital em uso na propriedade.

Tabela 4: Estatística descritiva das variáveis utilizadas no modelo de fronteira estocástica (modelo 2)

Variável	Média	Desvio padrão	p25	p50	p75
Quantidade	39263,63	671833	240	900	4800
Área	8,62	118,31	0,5	1	2,42
Trabalho	3,42	9,96	2	3	4
Capital	3892,69	672521,19	1	261,2	960
Despesa	28618,44	1039683,6	360	857,25	3880
Temperatura	24,09	3,07	21,27	24,93	26,87
Precipitação	95,14	40,61	56,76	93,18	124,58
Anomalia temperatura	15,17	10,71	0,58	20,43	23,94
Anomalia precipitação	66,62	56,37	0,06	62,33	118,26
	= 0			= 1	
<i>Dummy</i> Capital		54,7%			45,3%
Sudeste		88,81%			11,19%
Sul		70,80%			29,17%
Centro-Oeste		97,55%			2,43%
Grupo de área 1		94,92%			5,06%
Grupo de área 2		97,93%			2,08%
Armazém		83,36%			16,61%
Cooperativa		52,61%			47,35%
Assistência técnica		74,81%			25,18%
Atividade principal		79,29%			20,69%
Plantio direto		89,20%			10,80%
Rotação de Culturas		86,18%			13,82%
Número de observações			2.698.696		

Fonte: Elaborado pelo autor



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando alcançar os objetivos propostos e os procedimentos abordados na seção anterior, esta seção foi dividida em três etapas. Na primeira é caracterizada a produção de milho no Brasil segundo os Censos Agropecuários de 1995/96, 2006 e 2017. Na segunda, avalia-se a eficiência e a produtividade dos produtores de milho considerando os três últimos Censos. Por fim, na terceira etapa analisa-se os potenciais impactos da adoção das práticas agrícolas conservacionistas. Assim, como mencionado anteriormente, considerou-se os dois últimos Censos Agropecuários.

### 4.1. Caracterização da produção de milho no Brasil, um olhar sob os Censos Agropecuários

A produção de milho configura-se como uma importante atividade da economia agrícola brasileira, se fazendo presente na maioria dos municípios. Em 1995/96, cerca de 2,5 milhões de estabelecimentos agropecuários produziam milho em grão. Em 2006, este contingente diminuiu para aproximadamente 2 milhões de estabelecimentos, alcançando cerca de 1,6 milhões em 2017.

Apesar do menor número de estabelecimentos agropecuários produtores de milho, com o passar dos anos, tem-se evidenciado uma maior produção do grão no país, passando de 25,39 milhões de toneladas em 1995/96 para 99,1 milhões de toneladas em 2017, um crescimento de 290,03% no período. Na mesma comparação, observa-se que o valor da produção de milho mais que dobrou ao longo dos 22 anos (104,48% - em termos reais), passando de R\$ 16,75 bilhões em 1995/96 para R\$ 34,25 bilhões em 2017, representando uma taxa de crescimento de 2,15% a. a. entre 1995/96 e 2006, 4,47% a.a. entre 2006 e 2017 e de 3,30% a.a. entre 1995/96 e 2017.

Na Tabela 5 são apresentadas as informações sobre os números de estabelecimentos produtores de milho no Brasil e nas suas regiões, bem como o valor da produção, a quantidade produzida e a área colhida nos três últimos Censos Agropecuários. Observa-se que as variações do número de estabelecimentos produtores, da área colhida e dos preços implícitos<sup>12</sup> do grão evidenciam alguns *insights* iniciais sobre as possíveis causas e magnitudes das variações do valor da produção e da quantidade produzida. No período de 1995/96 a 2017 observou-se uma queda do número de estabelecimentos produtores de milho no Brasil (-33,81%) e do preço implícito do grão (-41,07%), enquanto a área colhida aumentou apenas 50,31%, sugerindo que parte significativa dos aumentos do valor da produção e da quantidade produzida possam estar atrelados aos ganhos produtivos da cultura. Destaca-se que este comportamento se mantém ao se analisar os períodos de 1995/96 a 2006 e de 2006 a 2017, mas com magnitudes diferentes das taxas de variações.

---

<sup>12</sup> Razão entre o valor da produção e a quantidade produzida.



Tabela 5: Número de estabelecimentos, valor da produção, quantidade produzida e a área colhida da cultura do milho do Brasil e das regiões nos Censos Agropecuários de 1995/96, 2006 e 2017

Região	Variável	1995/96	2006	2017
BR	Número de estabelecimentos	2.501.195,00	2.013.548,00	1.655.450,00
	Área colhida (ha)	10.501.180,39	11.537.748,38	15.783.895,00
	Quantidade produzida (t)	25.387.696,34	41.271.875,34	88.099.621,72
	Valor da produção (Mil R\$ de 2017)	16.749.748,23	21.169.385,60	34.250.904,34
N	Número de estabelecimentos	132.600,00	67.920,00	84.976,00
	Área colhida (ha)	253.140,17	215.000,81	543.100,84
	Quantidade produzida (t)	263.795,79	520.370,71	2.020.919,42
	Valor da produção (Mil R\$ de 2017)	233.296,41	404.257,10	1.056.899,18
NE	Número de estabelecimentos	1.235.735,00	1.156.206,00	960.765,00
	Área colhida (ha)	2.354.784,76	3.141.008,97	1.650.408,68
	Quantidade produzida (t)	1.806.860,17	5.485.214,74	5.529.456,48
	Valor da produção (Mil R\$ de 2017)	1.515.432,28	3.367.516,19	3.029.611,19
SE	Número de estabelecimentos	355.691,00	226.161,00	179.480,00
	Área colhida (ha)	2.134.745,30	1.618.987,17	1.548.442,98
	Quantidade produzida (t)	5.901.576,47	7.482.244,71	9.556.898,63
	Valor da produção (Mil R\$ de 2017)	4.092.839,54	4.159.584,58	4.676.553,67
S	Número de estabelecimentos	691.269,00	520.372,00	389.035,00
	Área colhida (ha)	4.078.333,92	4.175.509,08	3.684.268,99
	Quantidade produzida (t)	11.799.296,29	18.417.810,68	22.417.661,99
	Valor da produção (Mil R\$ de 2017)	7.860.435,93	8.996.792,86	10.309.899,72
CO	Número de estabelecimentos	85.900,00	42.889,00	41.194,00
	Área colhida (ha)	1.680.176,25	2.387.242,35	8.357.673,52
	Quantidade produzida (t)	5.616.167,61	9.366.234,50	48.574.685,21
	Valor da produção (Mil R\$ de 2017)	3.047.744,07	4.241.234,88	15.177.940,57

Fonte: Elaborado pelo autor

Evidencia-se também que este comportamento se deu de forma heterogênea entre as regiões brasileiras. Como mencionado anteriormente, de 1995/96 a 2017, observou-se um crescimento da produção de milho no Brasil, explicado, em partes, pelas maiores áreas colhida e produtividade. Entretanto, algumas regiões apresentam redução da área atribuindo, assim, a maior produção exclusivamente aos ganhos produtivos, como é o caso das regiões Nordeste, Sudeste e Sul.

A Figura 7 apresenta as variações dos números de estabelecimentos produtores de milho no Brasil e nas regiões geográficas, bem como do valor da produção, da quantidade produzida e da área colhida, considerando os períodos de 1995/96 a 2006, de 2006 a 2017 e de 1995/96 a 2017. Entre 1995/96 e 2006, as maiores variações relativas na produção do grão ocorreram nas regiões Norte e Nordeste, devido ao crescimento expressivo das produções nos estados do Acre, Pará, Amapá, Tocantins, Maranhão Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoa e Sergipe – a maioria dos estados mais que dobraram as suas respectivas produções. Para a região Sudeste até se observou um crescimento expressivo da produção do grão no estado de Minas Gerais (67,14%), mas a queda da produção nos outros estados da região reduziu o impacto desse aumento no período analisado. Na região Sul observou-se aumentos em todos os estados, destacando Santa Catarina e Rio Grande do Sul que apresentaram crescimento superior a 77%. Já para a região Centro-Oeste, apesar da maior produção em todos os estados, destaca-se o Mato Grosso, que expandiu a produção em 240,76%.

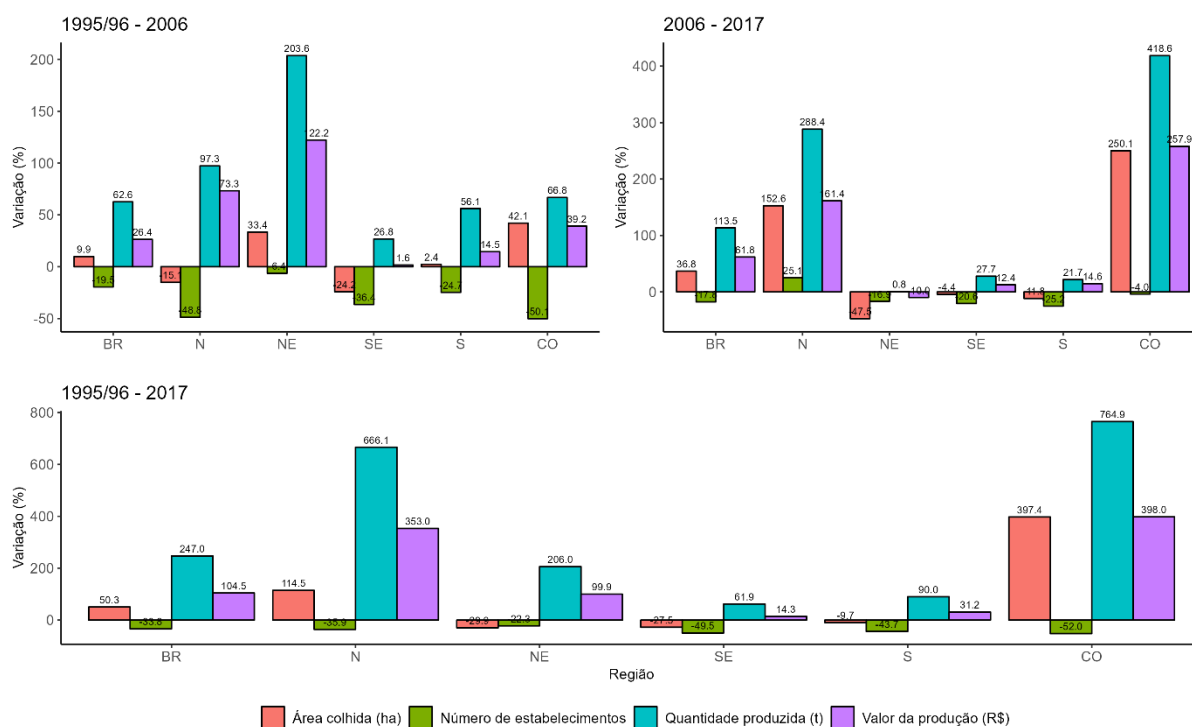


Figura 7: Variação do número de estabelecimentos, do valor da produção, da quantidade produzida e da área colhida da cultura do milho do Brasil e das regiões nos períodos de 1995/96 a 2006, de 2006 a 2017 e de 1995/96 a 2017  
Fonte: Elaborado pelo autor

Entre 2006 e 2017, as maiores variações relativas da produção de milho foram observadas nas regiões Centro-Oeste e Norte. No Centro-Oeste todos os estados apresentaram ganhos expressivos na produção, com Mato Grosso apresentando uma variação de 592,83%. Na região Norte ressalta-se o “surgimento” da produção em Rondônia, e as expressivas variações para Pará e Tocantins. Embora a região Nordeste tenha apresentado queda na quantidade produzida, destacam-se os estados que compõem a região do MATOPIBA, os quais apresentaram as maiores variações relativas – na maioria dos casos, mais do que dobraram as respectivas produções. No Sudeste, novamente, observou-se uma maior produção no estado de Minas Gerais e quedas expressivas no Espírito Santo e Rio de Janeiro. Já no Sul, Paraná aumentou a sua produção, enquanto Santa Catarina apresentou redução.

Como evidenciado até o momento, parte desta expansão é oriunda da maior utilização de terras agrícolas. A expansão da área cultivada no período foi impulsionada pela demanda crescente por milho tanto para consumo interno, especialmente na produção de ração animal, quanto para exportação (ALVES; CONTINI; GASQUES, 2008) e pela expansão da fronteira agrícola, com novas áreas sendo incorporadas à produção de milho. Adicionalmente, na década de 1990 ocorreu o surgimento do milho “safrinha” (segunda safra), o que proporcionou uma oportunidade para intensificar o cultivo de verão com outras culturas, também gerando um aumento da área destinada à cultura. Destaca-se que a possibilidade de cultivar o milho em duas safras foi viabilizada pelo desenvolvimento de variedades de soja de ciclo mais curto, juntamente com a disseminação e o uso mais eficiente de máquinas, equipamentos e implementos agrícolas, e melhores práticas agrícolas (ALVES et al., 2018; BOLFE et al., 2016).

Com essa dinâmica, observou-se uma mudança na participação regional na composição da produção nacional. Por exemplo, em 1995/96, as regiões Sul e Sudeste eram responsáveis por aproximadamente 69,72% da produção de milho nacional, passando para 36,26% em 2017. A região Nordeste também perdeu representatividade no período analisado, passando de 7,12% para 6,28%.

Por sua vez, as regiões Centro-Oeste e Norte, esta em menor magnitude, passaram a ter uma maior representatividade, com a região Centro-Oeste sendo responsável por 55,14% da produção de milho nacional em 2017 – liderada pela produção do Mato Grosso. Como pode se observar na Tabela 5 e Figura 7, a maior produção da região Centro-Oeste é explicada, em partes, pela maior área colhida, em especial entre 2006 e 2017, quando se observou a incorporação de quase 6 milhões de hectares. Entretanto, a sustentação dessa maior produção é explicada mais pelo maior rendimento por área do que pela maior área destinada à cultura (ALVES et al., 2018).

Somado a estes fatores, o avanço da agricultura no cerrado, a procura dos produtores por inovações tecnológicas, a evolução de sementes mais adequadas às características edafoclimáticas específicas de cada localidade, a aquisição de equipamentos com maior eficiência e desempenho e o desenvolvimento de técnicas que reduzem as perdas físicas e preservam a qualidade são elementos que também permitiram uma transformação e a dinâmica observada na cadeia produtiva do milho (ALBUQUERQUE; DA SILVA, 2008; ARTUZO et al., 2019; CHADDAD, 2017).

Quanto ao rendimento médio da produção, em 1995/96 os estabelecimentos produtores de milho no Brasil produziram, em média, 1.783,69 kg/ha. Em 2006, o rendimento médio foi de 1.929,24 kg/ha e alcançou 2.254,27 kg/ha em 2017. Este resultado é reflexo dos ganhos superiores da produção ao se comparar a expansão da área destinada à cultura, favorecidos pelas melhores condições do ambiente produtivo, pela incorporação de tecnologias e adoção de melhores práticas agrícolas. A Tabela 6 apresenta o rendimento médio da cultura para os três anos censitários ao nível nacional e para UFs.

Como pode se observado na Tabela 6, a dinâmica e a evolução do rendimento médio foram distintas entre as UFs. De modo geral, as UFs das regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste apresentaram os maiores rendimentos médios nos três anos censitários. Entretanto, vale ressaltar que os estados do Norte e Nordeste também apresentaram valores médios significativos, próximos dos encontrados, por exemplo, no estado do Pará, estado que possui tradição na produção de milho de primeira safra – considerado mais produtivo do que o de segunda safra.

Tabela 6: Rendimento médio da cultura do milho do Brasil e das UFs nos Censos Agropecuários de 1995/96, 2006 e 2017

	1995/96*	2006*	2017*	$\Delta$ 1995/96- 2006 (%)	$\Delta$ 2006-2017 (%)	$\Delta$ 1995/96- 2017 (%)
Rondônia			2.756,04			
Acre	1.926,48	2.370,92	2.283,21	23,07	-3,70	18,52
Amazonas	2.264,85	2.440,19	3.117,21	7,74	27,74	37,63
Roraima	3.914,59	1.506,12	3.712,89	-61,53	146,52	-5,15
Pará	1.581,04	1.616,05	1.854,15	2,21	14,73	17,27
Amapá	801,23	3.318,49	1.787,92	314,18	-46,12	123,15
Tocantins	1.271,19	3.267,34	2.626,94	157,03	-19,60	106,65
Maranhão	1.046,08	1.837,90	1.267,54	75,69	-31,03	21,17
Piauí	736,81	1.089,58	839,79	47,88	-22,93	13,98
Ceará	1.006,50	1.230,42	859,57	22,25	-30,14	-14,60
Rio Grande do Norte	469,12	1.098,81	606,18	134,23	-44,83	29,22
Paraíba	714,65	844,83	574,51	18,22	-32,00	-19,61
Pernambuco	839,82	1.045,81	765,28	24,53	-26,82	-8,88
Alagoas	1.411,79	1.084,09	698,09	-23,21	-35,61	-50,55
Sergipe	964,28	1.195,08	1.996,55	23,93	67,06	107,05
Bahia	630,46	1.046,19	906,39	65,94	-13,36	43,77
Minas Gerais	2.223,08	2.341,97	2.931,84	5,35	25,19	31,88
Espírito Santo	1.885,84	2.114,10	2.487,13	12,10	17,64	31,88
Rio de Janeiro	2.308,41	3.729,23	2.658,62	61,55	-28,71	15,17
São Paulo	3.218,00	3.921,46	4.747,44	21,86	21,06	47,53
Paraná	3.058,76	3.548,43	4.789,26	16,01	34,97	56,58
Santa Catarina	3.156,62	3.753,47	5.957,06	18,91	58,71	88,72
Rio Grande do Sul	3.080,04	2.905,43	4.823,68	-5,67	66,02	56,61
Mato Grosso do Sul	2.156,68	2.653,73	4.079,64	23,05	53,73	89,16
Mato Grosso	1.997,57	2.241,25	4.513,23	12,20	101,37	125,94
Goiás	2.378,73	2.902,51	4.170,18	22,02	43,67	75,31
Distrito Federal	3.261,51	3.825,33	3.630,00	17,29	-5,11	11,30
<b>Brasil</b>	<b>1.783,69</b>	<b>1.929,24</b>	<b>2.254,27</b>	<b>8,16</b>	<b>16,85</b>	<b>26,38</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*apresentados em kg/ha

Embora toda essa dinâmica, uma característica importante da produção brasileira de milho em grão é a representatividade de pequenos produtores. Por exemplo, em 1995/96 aproximadamente 57% dos estabelecimentos agropecuários produtores de milho em grão colheram menos do que 2 ha. Entretanto, estes estabelecimentos representaram apenas 11,52% da área colhida total de milho, 5,83% da quantidade total produzida e 7,25% do valor da produção da cultura. Para comparação, neste mesmo ano censitário, 0,39% dos estabelecimentos colheram 100 ha ou mais, representando 25% do total da área colhida nacional do grão, 38,55% da produção e 34,69% do valor da produção. Na Figura 8, apresenta-se a representatividade dos estabelecimentos produtores de milho, da área colhida, da quantidade produzida e do valor da produção nos três anos censitários considerando dez grupos de área colhida.

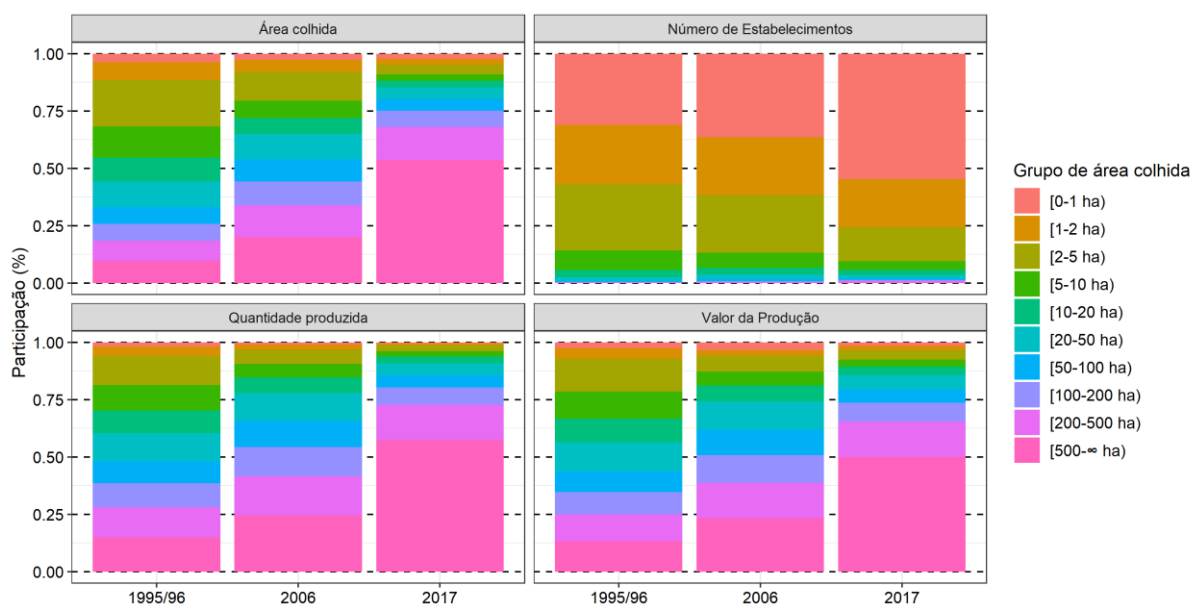


Figura 8: Proporção do número de estabelecimentos, do valor da produção, da quantidade produzida e da área colhida da cultura do milho do Brasil por grupo de área colhida em 1995/96, 2006 e 2017

Fonte: Elaborado pelo autor

Com o passar dos anos, observa-se que essa disparidade foi se intensificando. Em 2017, 75,68% dos estabelecimentos agropecuários produtores de milho colheram menos de 2 ha, representando 4,84% da área colhida total, 1,45% da produção e 3,47% do valor da produção. Por outro lado, 1,30% dos estabelecimentos colheram 100 ha ou mais em 2017, representando 75,07% do total da área colhida nacional do grão, 80,29% da produção e 73,57% do valor da produção.

Quanto aos fatores de produção, especificamente à população ocupada, observa-se que com o passar dos anos os estabelecimentos agropecuários produtores de milho têm empregado um menor número de pessoas. A Tabela 7 apresenta as informações sobre o contingente ocupado nos estabelecimentos produtores de milho, bem como a sua composição ao nível regional. Adicionalmente, apresenta-se o número de estabelecimentos que possuíam pelo menos uma pessoa ocupada ou pelo menos uma unidade de equivalente-homem total. Entre 1995/96 e 2017, o contingente ocupado nesses estabelecimentos reduziu 38,72%, redução mais intensa do que a observada no número de estabelecimentos produtores de milho. O mesmo movimento é evidenciado quando se analisa o número de EHT, que apresentou redução de 38,93% entre 1995/96 e 2017. Entretanto, este não é um comportamento exclusivo da produção de milho, visto a redução sistemática do pessoal ocupado nos estabelecimentos agropecuários, resultado do menor número de estabelecimentos, do número médio de pessoas ocupadas e da intensidade da utilização de mão de obra por área (BUAINAIN; DEDECCA, 2010; DELGROSSI; BALSADI, 2020).

Tabela 7: Número de pessoas ocupadas e de equivalente-homem total nos estabelecimentos produtores de milho e número de estabelecimentos que possuem pelo menos uma pessoa ocupada ou pelo menos uma unidade de equivalente-homem total por uma unidade no Brasil e suas regiões, 1995/96, 2006 e 2017

		1995/96		2006		2017	
		Quantidade	Possui?*	Quantidade	Possui?*	Quantidade	Possui?*
Pessoal Ocupado	N	6,30%	5,30%	4,02%	3,37%	6,56%	5,13%
	NE	46,99%	49,41%	57,23%	57,42%	56,53%	58,04%
	SE	16,58%	14,22%	12,54%	11,23%	12,09%	10,84%
	S	25,83%	27,64%	23,60%	25,84%	20,41%	23,50%
	CO	4,29%	3,43%	2,61%	2,13%	4,41%	2,49%
	Total BR	9.271.421	2.501.195	6.620.292	2.013.489	5.681.863	1.655.442
Equivalente Homem Total	N	6,34%	5,30%	4,02%	3,37%	6,56%	5,13%
	NE	46,42%	49,41%	56,98%	57,42%	55,73%	58,04%
	SE	17,02%	14,22%	12,71%	11,23%	12,27%	10,84%
	S	25,67%	27,64%	23,61%	25,84%	20,52%	23,50%
	CO	4,55%	3,43%	2,67%	2,13%	4,92%	2,49%
	Total BR	9.475.727	2.501.195	6.667.739	2.013.492	5.786.217	1.655.444

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*Contabiliza o número de estabelecimentos produtores de milho que possuem pelo menos uma pessoa ocupada ou uma unidade de equivalente-homem total

Na Tabela 8, apresenta-se informações sobre a quantidade de tratores e implementos agrícolas nos estabelecimentos produtores de milho, bem como o quantitativo de estabelecimentos que possuem tratores, implementos ou tratores e implementos. De modo geral, observa-se que poucos estabelecimentos possuíam tratores ou implementos nos três Censos Agropecuários, sendo que em 1995/96 apenas cerca de 271 mil dos mais de 2,50 milhões de estabelecimentos produtores de milho (ver Tabela 5), ou seja, apenas 10,83% dos estabelecimentos possuíam pelos menos um trator, e apenas cerca de 173 mil (ou seja, 6,90% do total) possuíam pelo menos um dos implementos agrícolas considerados. Em 2017, estas proporções foram de 14,95% e 8,50%, respectivamente, sendo que havia aproximadamente 1,65 milhão de estabelecimentos produzindo milho neste ano (ver Tabela 5). Ressalta-se que, embora tenha se observado uma maior representatividade, o número de estabelecimentos que possui algum desses itens reduziu no período entre 1995/96 e 2017.

A Tabela 8 também evidencia um comportamento distinto entre os subperíodos. Embora tenha se observado uma maior quantidade no período entre 1995/96 e 2017, houve uma queda entre 1995/96 e 2006, e novamente um crescimento entre 2006 e 2017, tanto para tratores quanto para os implementos agrícolas. Segundo Silva, Baricelo e Vian (2020), tem-se por hipóteses que o crescimento no subperíodo 2006-2017 foi reflexo da criação de linhas de créditos de financiamento governamental para aquisição de máquinas agrícolas (seja para grande, médio ou pequeno produtor), maior financiamento privado na agricultura e maior nível de capitalização dos produtores.

Tabela 8: Número de tratores e implementos agrícolas no Brasil e suas regiões, 1995/96, 2006 e 2017

	Região	1995/96		2006		2017	
		Quantidade	Possui?*	Quantidade	Possui?*	Quantidade	Possui?*
Número de Tratores	N	1,00%	0,91%	1,02%	0,88%	2,02%	1,64%
	NE	4,35%	4,51%	6,73%	7,32%	5,39%	5,75%
	SE	27,26%	24,51%	18,71%	15,73%	17,21%	14,16%
	S	55,43%	61,63%	62,77%	70,61%	59,82%	71,58%
	CO	11,95%	8,43%	10,77%	5,46%	15,56%	6,87%
	Total BR	400.799	270.908	308.663	209.924	432.412	247.412
Número de Implementos**	N	0,51%	0,53%	0,72%	0,63%	1,74%	1,34%
	NE	3,61%	3,84%	9,08%	10,34%	3,85%	3,59%
	SE	20,15%	21,13%	13,51%	11,17%	14,54%	13,69%
	S	61,79%	66,44%	66,15%	72,67%	61,53%	71,44%
	CO	13,93%	8,06%	10,54%	5,19%	18,34%	9,95%
	Total BR	316.003	172.693	307.669	159.099	368.819	140.685
Número de Tratores e Implementos	N	0,78%	0,87%	0,87%	0,86%	1,89%	1,67%
	NE	4,03%	5,27%	7,90%	10,59%	4,68%	5,94%
	SE	24,13%	23,40%	16,11%	13,32%	15,98%	14,57%
	S	58,23%	62,59%	64,46%	70,69%	60,61%	71,01%
	CO	12,83%	7,86%	10,65%	4,53%	16,84%	6,81%
	Total BR	716.802	302.406	616.332	256.972	801.231	251.815

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*Contabiliza o número de estabelecimentos produtores de milho que possuem pelo menos um trator ou implemento agrícola considerado; \*\* Plantadeiras, adubadeiras e colheitadeiras

Quanto à adoção das práticas agrícolas plantio direto e rotação de culturas, observa-se uma baixa adesão dos estabelecimentos produtores de milho, sendo as regiões Sul e Nordeste aquelas com os maiores números de adotantes – em termos absolutos. No que se refere à capacidade de armazenagem, verifica-se que o número de estabelecimentos que possuía alguma estrutura para armazenamento de grãos se reduziu ao longo do período, diminuindo de 462,26 mil estabelecimentos em 1995/96 para 127,35 mil em 2017. Para o acesso à assistência técnica, o comportamento foi semelhante, embora a quantidade de estabelecimentos produtores de milho com acesso à assistência técnica seja superior ao daqueles que possuem alguma estrutura de armazenagem. Na Tabela 9 há informações sobre o número de estabelecimentos agropecuários produtores de milho que adotaram plantio direto e rotação de cultura, possuem capacidade de armazenagem e tem acesso à assistência técnica, bem como os que participam de cooperativa e têm a lavoura de milho como principal atividade econômica nos três últimos Censos Agropecuários.

Tabela 9: Número de estabelecimentos agropecuários produtores de milho que adotaram plantio direto e rotação de cultura, possui capacidade de armazenagem, participa de cooperativa, tem acesso à assistência técnica e possui o milho como atividade principal

	Região	1995/96	2006	2017
Plantio Direto*	N		2,27%	2,67%
	NE		14,50%	11,70%
	SE		5,95%	8,86%
	S		74,74%	71,26%
	CO		2,55%	5,51%
	BR		345.685	320.905
Rotação de Culturas*	N		1,15%	3,68%
	NE		24,04%	27,10%
	SE		9,36%	12,85%
	S		63,08%	52,95%
	CO		2,37%	3,42%
	BR		381.420	471.193
Capacidade Armazém	N	2,49%	1,92%	1,48%
	NE	20,25%	34,22%	27,27%
	SE	23,63%	16,94%	22,19%
	S	49,42%	44,64%	46,29%
	CO	4,21%	2,28%	2,78%
	BR	462.259	421.272	127.352
Cooperativa	N	1,10%	3,28%	3,69%
	NE	7,82%	56,36%	55,04%
	SE	20,20%	9,36%	10,65%
	S	67,28%	29,44%	28,57%
	CO	3,61%	1,56%	2,04%
	BR	412.401	882.147	791.155
Assistência Técnica	N	1,23%	2,04%	2,61%
	NE	6,71%	19,50%	21,41%
	SE	18,80%	12,55%	12,81%
	S	67,85%	62,34%	58,30%
	CO	5,41%	3,57%	4,87%
	BR	509.127	453.262	357.048
Atividade econômica principal	N	2,24%	2,11%	2,32%
	NE	42,51%	56,70%	61,25%
	SE	13,48%	11,81%	11,12%
	S	38,93%	27,24%	23,63%
	CO	2,84%	2,14%	1,68%
	BR	308.256	416.625	346.844

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \* informações disponíveis apenas para os Censos Agropecuários de 2006 e 2017

Em relação à participação em cooperativas, observa-se na Tabela 9 uma baixa adesão dos estabelecimentos produtores de milho, embora o contingente tenha se alterado ao longo do período. Um fato que chama a atenção é o crescimento entre 1995/96 e 2006, reflexo da maior participação ou adesão dos estabelecimentos da região Nordeste – que representou 56,36% dos estabelecimentos produtores de milho que participaram de alguma cooperativa e/ou alguma entidade de classe ou associação. Por fim, evidencia-se que uma parcela pequena dos produtores analisados possui o milho como atividade econômica principal, sendo que, em sua maioria, desenvolvem a atividade na região Nordeste.



## 4.2. Eficiência e produtividade na produção de milho no Brasil

Inicialmente, buscou-se encontrar suporte para a especificação de fronteira estocástica do modelo 1, verificando a existência do termo de ineficiência ( $u_{it}$ ), ou seja, de uma distribuição dos resíduos assimétrica à esquerda e uma estatística de assimetria estatisticamente significativa. Dessa forma, ao se analisar os resíduos do modelo estimado por MQO, a estatística de assimetria (-0,1156) indicou uma distribuição assimétrica à esquerda, com os testes propostos por D'agostino, Belanger e D'agostino Jr. (1990) e Coelli (1995) rejeitando a hipótese nula de não haver assimetria nos resíduos da estimação por MQO a um nível de 1% de significância.

Verificado a existência do termo de ineficiência, partiu-se para a estimação da fronteira estocástica, em que o teste de Razão de Verossimilhança mostrou o valor de 11.939,33, indicando que o modelo estimado por MQO é rejeitado em favor do modelo estimado por meio da SFA<sup>13</sup>. Na Tabela 10, estão os coeficientes estimados via fronteira estocástica da tecnologia Cobb-Douglas, no qual todos os parâmetros se mostraram estatisticamente significativos ao nível de 1% de significância, e todas as condições de regularidade relativas às elasticidades são satisfeitas.

Tabela 10: Resultados do modelo empírico, modelo 1

	Coeficientes	Erro padrão
ln(área)	0,883***	0,000350
ln(trabalho)	0,00427***	0,000559
ln(capital)	0,0431***	0,00144
ln(despesa)	0,115***	0,0002991
<i>Dummy</i> capital	-0,144***	0,00138
t	0,0989***	0,000509
ln(temperatura)	-0,0579***	0,00686
ln(precipitação)	0,327***	0,00122
Anomalia temperatura	-0,00910***	0,0000691
Anomalia precipitação	0,00173***	0,0000202
Sul	0,925***	0,00229
Centro-Oeste	0,761***	0,00269
Sudeste	0,639***	0,00174
Grupo de área 1	0,312***	0,00185
Grupo de área 2	0,541***	0,00351
Armazém	0,0875***	0,000941
Cooperativa	-0,0499***	0,000787
Assistência técnica	0,112***	0,00101
Atividade principal (milho)	0,451***	0,000949
Constante	4,771***	0,0228
<i>U</i> sigmas		
Constante	-0,873***	0,00649
<i>V</i> sigmas		
Constante	-0,885***	0,00236
Total de observações	4815637	
Log likelihood	-5449512,8	
Wald chi2	27222137,9	
Prob > chi2	0,0000	

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*p<0,1; \*\* p<0,05; \*\*\* p<0,01

<sup>13</sup> O valor crítico da estatística ao nível de 1% de significância é 5,412.

A soma dos coeficientes das variáveis terra, capital, trabalho e despesas agrícolas foi igual a 1,041, indicando que o aumento no uso de todos os insumos deve elevar mais que proporcionalmente a produção de milho. Por meio do teste de Wald, a hipótese nula de retornos constantes à escala foi rejeitada ao nível de significância de 1%. Soares (2017) e Soares e Spolador (2019) encontram resultado semelhante ao analisarem produtores de milho no Brasil e no estado de São Paulo.

Observa-se que o insumo terra possui a maior elasticidade, indicando que ele possui maior potencial para aumentar a produção de milho no Brasil. Soares (2017) e Soares e Spolador (2019) também observaram a importância do fator terra, sendo a variável de maior impacto para aumentar a produção. Entretanto, como destacado por Soares (2017), a expansão da produção via maior utilização de terras agrícolas é inviabilizada, muitas vezes, pelas restrições legais sobre o uso do solo (por exemplo, Código Florestal).

O insumo despesa agrícola apresentou uma elasticidade intermediária, enquanto trabalho e capital apresentaram elasticidade menores. Embora tenham analisado a agropecuária como um todo, Lázari e Magalhães (2019) e Ferreira e Vieira Filho (2020) evidenciaram a importância das despesas com insumos para o aumento da produção agropecuária, e sua maior elasticidade ao se comparar com os insumos capital e trabalho.

O coeficiente de tendência temporal ( $t$ ) da função de produção é positivo e estatisticamente significativo, indicando a presença de progresso técnico médio de 0,43% ao ano entre 1995/96 e 2017. Esse resultado é consistente com os fatos observados na produção de milho brasileira, e os *insights* levantados na subseção anterior.

No que diz respeito às variáveis climáticas, tanto a anomalia de temperatura quanto a temperatura média exercem uma influência negativa na produção. Isso implica que um aumento da temperatura média resultará em um impacto negativo significativo na produção, com o efeito da temperatura média se intensificando ao longo do tempo. Em contrapartida, os aumentos da precipitação (anomalia) e da precipitação média têm um impacto positivo e significativo na produção. Em geral, a cultura do milho é altamente suscetível a condições climáticas e requer fatores edafoclimáticos ideais para seu desenvolvimento. Por exemplo, quando exposto a um ambiente com baixa precipitação e altas temperaturas durante o verão, o milho tende a ter sua produtividade reduzida (ARTUZO et al., 2019; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

As *dummies* regionais e de grupos de áreas indicam que as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste e produtores com 10 ha ou mais de área colhida possuem maiores produções médias (tendo como base as regiões Norte-Nordeste e produtores com menos de 10 ha). Quanto às demais variáveis, a existência de capacidade de armazenagem, o acesso à assistência técnica e ter o milho como principal atividade econômica impactam positivamente a produção de milho.

Ferreira e Vieira Filho (2020) mostraram que a capacidade de armazenagem afeta diretamente a tomada de decisão do produtor quanto a comercialização do grão, possibilita a redução das perdas do produto e conserva a suas qualidades físicas e químicas. Os autores também analisaram que a maior capacidade de armazenagem está associada a maior eficiência no processo produtivo. Souza, Gomes e Alves (2020) também mostraram que a associação em cooperativas e o acesso à assistência técnicas configuram um dos principais fatores redutores de imperfeições de mercado e promotores de renda.

Dentre outros benefícios, Costa, Vizcaino e Costa (2020) mencionaram que, ao se associar às cooperativas, os produtores podem melhorar a sua tecnologia com o intuito alcançar maiores eficiências produtiva. Entretanto, a variável relacionada à associação do produtor a cooperativas apresenta um resultado não esperado *a priori*, impactando negativamente a produção de milho. Apesar de avaliar a agropecuária brasileira, Neves, Castro e

Freitas (2019) verificaram um efeito negativo do cooperativismo no Valor Bruto da Produção da agropecuária nos municípios das regiões Norte e Nordeste.

No que se refere à eficiência técnica, a teoria econômica define um produtor como sendo tecnicamente eficiente e operando na fronteira quando a estimativa é 100%, ou seja, o produto observado equivale ao produto potencial. Verificou-se que a eficiência técnica nos estabelecimentos analisados foi, em média, de 64,8%, com variações entre 8,3% e 88,5%, implicando que, na média, os produtores de milho produzem 64,8% do nível máximo possível, ou aproximadamente 35% do produto potencial é perdido devido à ineficiência técnica. Ao se analisar as médias anuais, não se observa mudanças significativas ao longo do período<sup>14</sup>. Na Tabela 11 estão as médias das eficiências técnicas no período entre 1995/96 e 2017 e as médias anuais para o Brasil e para as UFs.

Tabela 11: Médias das eficiências técnicas no período entre 1995/96 e 2017 e as médias anuais para o Brasil e para as Unidades da Federação

	1995/96	2006	2017	1995/96-2017
Rondônia			0,714	0,714
Acre	0,726	0,700	0,746	0,727
Amazonas	0,689	0,662	0,708	0,691
Roraima	0,719	0,617	0,744	0,713
Pará	0,649	0,639	0,656	0,649
Amapá	0,625	0,711	0,645	0,651
Tocantins	0,716	0,664	0,711	0,703
Maranhão	0,610	0,622	0,664	0,627
Piauí	0,658	0,600	0,603	0,621
Ceará	0,670	0,648	0,611	0,642
Rio Grande do Norte	0,601	0,603	0,572	0,594
Paraíba	0,647	0,603	0,589	0,615
Pernambuco	0,660	0,632	0,606	0,636
Alagoas	0,737	0,616	0,634	0,672
Sergipe	0,690	0,666	0,721	0,688
Bahia	0,625	0,627	0,604	0,620
Minas Gerais	0,639	0,603	0,636	0,628
Espírito Santo	0,642	0,639	0,647	0,643
Rio de Janeiro	0,637	0,637	0,632	0,636
São Paulo	0,668	0,676	0,689	0,674
Paraná	0,645	0,666	0,668	0,657
Santa Catarina	0,645	0,673	0,709	0,668
Rio Grande do Sul	0,596	0,627	0,683	0,628
Mato Grosso do Sul	0,632	0,627	0,668	0,642
Mato Grosso	0,632	0,559	0,657	0,623
Goiás	0,663	0,602	0,686	0,654
Distrito Federal	0,641	0,633	0,641	0,639
Brasil	0,642	0,632	0,640	0,638

Fonte: Elaborado pelo autor

Com exceção de Amapá, Maranhão, Rio Grande do Norte, Bahia, Rio de Janeiro, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul em que as eficiências médias aumentaram ou permaneceram no mesmo patamar, as demais UFs vivenciaram quedas no nível de eficiência média entre 1995/96 e 2006. Entre 2006 e 2017, apenas Amapá, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Bahia, Rio de Janeiro, apresentaram quedas no nível de eficiência técnica médio.

<sup>14</sup> No Apêndice A está o histograma das eficiências técnicas do período entre 1995/96 e 2017 e para os anos censitários.

Na Figura 9 observa-se a distribuição espacial da eficiência técnica média ao nível municipal para o período de 1995-2017. De modo geral, é possível verificar certa heterogeneidade quanto à distribuição das eficiências técnicas médias, não sendo possível identificar um padrão de regiões tecnicamente eficientes. Por exemplo, a região Sul, tradicional região produtora de milho e que apresenta elevadas produtividades (ver Tabela 5 e Tabela 6), apresentam elevada heterogeneidade quanto à eficiência técnica média municipal. Um fato que chama a atenção são os altos valores médios encontrados para alguns municípios da região Norte.

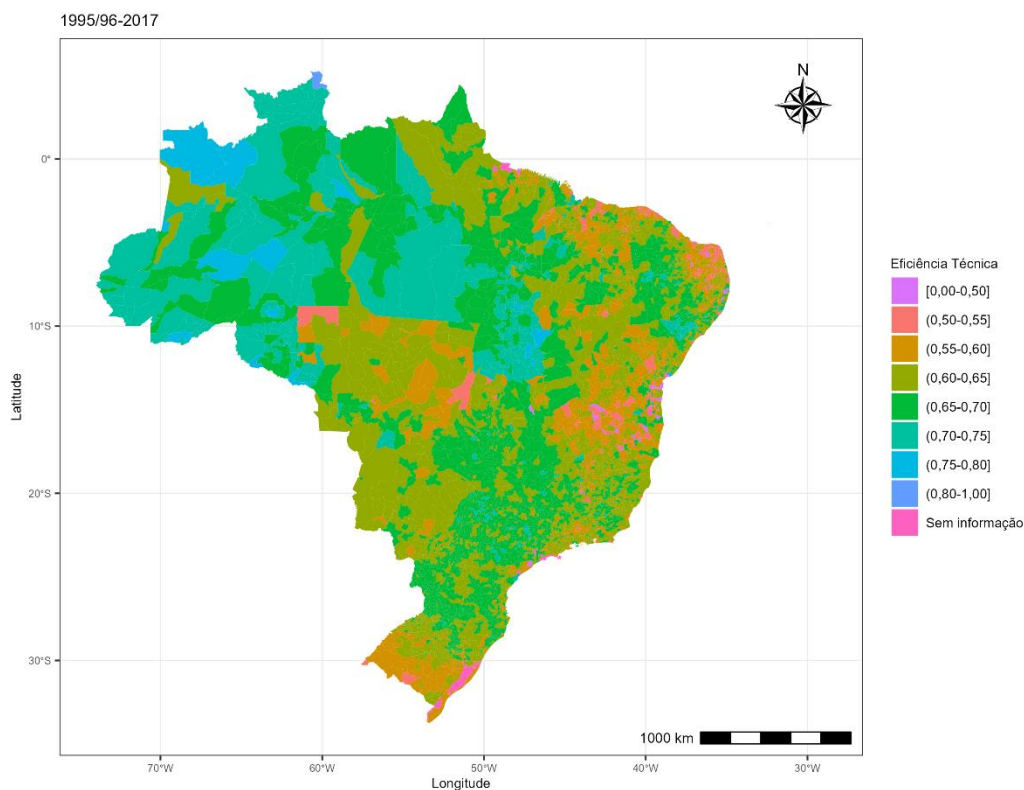


Figura 9: Distribuição espacial das eficiências técnicas médias por município no período entre 1995/96 e 2017  
Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.1. Análise da produtividade<sup>15</sup>

Como mencionado anteriormente, o crescimento da produtividade da lavoura é medido e decomposto por meio de um índice multiplicativo PTF definido pela eq. (17). Na Tabela 12 são apresentadas as variações da PTF e de seus componentes (inicialmente obtidos conforme a eq. (17)) no período entre 1995/96 e 2017, no qual se observou que a taxa média de crescimento da produtividade dos estabelecimentos produtores de milho foi de 0,759%, variando entre -3,703% em Alagoas e 4,006% no Mato Grosso. Trabalhos que avaliaram a produtividade da agropecuária brasileira obtiveram taxas de crescimento entre 2,21% e 5,32% ao ano (BRAGAGNOLO; SPOLADOR; BARROS, 2021; FELEMA; SPOLADOR, 2023; GASQUES et al., 2020). Assim, embora a lavoura apresente uma contribuição importante, a taxa média de crescimento da PTF dos produtores de milho no Brasil fica abaixo das encontradas para a agropecuária brasileira.

<sup>15</sup> Nesta discussão se desconsidera os produtores do estado de Rondônia, visto que, segundo dos dados dos Censos Agropecuários, não houve produção de milho em 1995/96 e 2006.

Tabela 12: Variação percentual da PTF e dos seus componentes por estado, 1995/96-2017

	IPTF	OCI	OEI	OSEI	OTEI	OTI	SNI
Acre	1,540	0,136	-0,049	-0,049	0,131	0,826	0,545
Amazonas	1,273	-0,001	-0,119	-0,170	0,118	0,826	0,619
Roraima	0,799	-0,156	-0,253	-0,417	0,157	0,826	0,641
Pará	0,985	-0,158	0,040	-0,067	0,041	0,826	0,303
Amapá	1,003	-0,161	-0,354	-0,219	0,064	0,826	0,847
Tocantins	0,875	-0,124	0,184	-0,063	-0,058	0,826	0,110
Maranhão	1,873	-0,592	0,103	-0,067	0,431	0,826	1,172
Piauí	-1,223	-0,422	0,171	-0,084	-0,418	0,826	-1,295
Ceará	-1,438	-0,361	0,033	-0,074	-0,446	0,826	-1,415
Rio Grande do Norte	-0,480	-0,227	-0,003	-0,099	-0,215	0,826	-0,762
Paraíba	-1,619	-0,328	0,054	-0,159	-0,423	0,826	-1,588
Pernambuco	-1,785	-0,572	0,030	-0,172	-0,397	0,826	-1,501
Alagoas	-3,703	-0,888	0,271	-0,006	-0,707	0,826	-3,200
Sergipe	1,930	-0,641	0,366	-0,007	0,207	0,826	1,179
Bahia	-0,230	-0,202	0,162	-0,188	-0,135	0,826	-0,692
Minas Gerais	-0,009	-0,535	0,056	-0,200	-0,046	0,826	-0,111
Espírito Santo	0,953	-0,046	0,159	-0,116	0,012	0,826	0,119
Rio de Janeiro	0,056	-0,207	0,024	-0,294	-0,070	0,826	-0,224
São Paulo	1,889	-0,175	0,354	0,025	0,129	0,826	0,729
Paraná	1,812	-0,052	0,179	0,033	0,160	0,826	0,665
Santa Catarina	2,746	-0,277	0,122	-0,040	0,452	0,826	1,663
Rio Grande do Sul	3,499	-0,080	0,181	-0,040	0,655	0,826	1,955
Mato Grosso do Sul	3,520	0,367	0,696	0,290	0,275	0,826	1,066
Mato Grosso	4,006	0,048	1,413	0,480	0,191	0,826	1,050
Goiás	1,847	-0,420	0,398	0,033	0,142	0,826	0,868
Distrito Federal	-0,393	-0,304	-0,576	-0,221	-0,028	0,826	-0,091
Brasil*	0,759	-0,245	0,140	-0,073	0,009	0,826	0,102

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*média aritmética

O principal impulsionador do crescimento da PTF durante o período foi o progresso técnico (*OTI*), que cresceu a uma taxa média de 0,826% ao ano. Este resultado está atrelado ao desenvolvimento e uso de novas tecnologias na produção do grão. Para Alves et al. (2018), os ganhos produtivos na lavoura são resultados da adoção de novas tecnologias adaptadas às condições edafoclimáticas brasileiras. Bahia Filho et al. (2008) argumentaram que o crescimento da produtividade do milho está relacionado com o avanço da área de melhoramento de plantas e com a melhoria nas práticas e processos produtivos. Contini et al. (2010) destacaram o papel da adoção de tecnologias e insumos modernos, como os fertilizantes e novas cultivares, a incorporação de terras mecanizáveis, a expansão do uso de máquinas agrícolas automotrizes e pelas inovações introduzidas no processo de produção, o sistema de plantio direto, o manejo integrado de pragas, entre outras, para os ganhos produtivos da agricultura brasileira, especialmente do milho de segunda safra.

O índice ambiental (*OEI*), que explica as mudanças na produtividade devido a fatores relacionados ao ambiente de produção foi o determinante da produtividade com o segundo maior impacto estimado, aumentando a uma taxa média de 0,14% ao ano, enquanto que mudança na eficiência técnica cresceu a uma taxa de 0,009% ao ano. Por outro lado, o índice de escala (*OSEI*) e de mudanças nas condições climáticas (*OCI*) reduziram a uma taxa média de 0,073% e 0,245% ao ano, respectivamente. Por fim, o *SNI*, que captura flutuações na PTF devido a fatores não identificados, teve uma média de 0,102% ao nível nacional.

Embora a área tenha um papel relevante para o aumento da produção (ver Tabela 10), com este resultado, observa-se que a incorporação de novas áreas por si só não se traduz em aumento de produtividade. Este era um pressuposto importante da agropecuária brasileira, que via uma relação positiva entre disponibilidade de área e desenvolvimento/crescimento da atividade ou do segmento. Ademais, como mencionado anteriormente, as restrições legais muitas das vezes inviabilizam a expansão da área destinada à cultura.

Nota-se na Tabela 12 que há variações substanciais do crescimento da produtividade e de seus componentes entre as UFs. No período analisado (1995/96 a 2017), Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Bahia, Minas Gerais e Distrito Federal registraram variações negativas da PTF. Embora tenha se observado ganhos tecnológicos nestas UFs, os resultados foram influenciados pelos índices referentes à eficiência técnica (*OTEI*) e às condições climáticas (*OCI*). Algumas UFs também apresentaram variação negativa do índice de escala (*OSEI*) e das condições do ambiente de produção (*OEI*). Para os estados que apresentaram crescimento da PTF, o principal determinante do crescimento foi o *OTI*, seguido do *OTEI*, *OCI* – no caso do Mato Grosso, *OSEI* – no caso do Mato Grosso e do Mato Grosso do Sul, e *OEI* em alguns outros estados. Ressalta-se que o índice de ruído estatístico (*SNI*) é responsável por uma parcela significativa da variação da PTF das UFs.

A heterogeneidade do resultado está relacionada à diversidade regional na combinação dos fatores de produção, condições edafoclimáticas, recursos naturais, disponibilidade e adoção de tecnologias, condições de mercados, entre outros. Segundo Mório e Fritsche-Neto (2015), um grande fator que contribui para a baixa produtividade de algumas regiões, como no caso de alguns estados do Nordeste, é a falta de adoção de tecnologias por parte dos agricultores, além de fatores climáticos específicos.

De modo geral, as regiões Centro-Oeste e Sul têm garantido o crescimento da produção de milho no Brasil – regiões onde as UFs apresentam as taxas de crescimento da PTF mais elevadas, embora a região Sul tenha perdido representatividade ao longo dos últimos anos (ver Figura 6). De acordo com Chaddad (2017), embora haja abundância de recursos naturais e tenha se observado incorporação de novas áreas e tecnologias, o domínio de tecnologias adaptáveis para as regiões tropicais viabilizou a ocupação do Centro-Oeste e do cerrado brasileiro. O destaque é dado para o Mato Grosso, que apresentou uma taxa média de crescimento da produtividade de 4,060%, superior à taxa média encontrada para o Brasil (Tabela 12) e às taxas encontradas para a agropecuária ou agricultura como um todo (BRAGAGNOLO; SPOLADOR; BARROS, 2021; GASQUES et al., 2020).

Além dos diferentes resultados por UF, destaca-se que o comportamento da PTF também não foi homogêneo ao se considerar os subperíodos 1995/96-2006 e 2006-2017. A Tabela 13 apresenta as variações da PTF e de seus componentes no período entre 1995/96 e 2006, no qual se observa uma taxa média de -0,064% ao ano, variando entre -7,361% em Alagoas e 6,519% no Amapá. Neste período específico, até houve crescimento positivo do progresso técnico e do ambiente de produção (*OEI*), mas os índices de eficiência técnica (*OTEI*) e das condições climáticas (*OCI*) tiveram impactos negativos predominantes na determinação dos resultados.

Tabela 13: Variação percentual da PTF e dos seus componentes por estado, 1995/96-2006

	TFPI	OCI	OEI	OSEI	OTEI	OTI	SNI
Acre	0,652	0,581	0,324	0,030	-0,425	0,826	-0,684
Amazonas	0,021	0,318	0,310	-0,050	-0,468	0,826	-0,915
Roraima	-5,229	0,268	-0,062	-0,037	-1,614	0,826	-4,609
Pará	1,203	-0,036	0,410	0,040	-0,217	0,826	0,181
Amapá	6,519	0,293	-0,049	-0,510	1,141	0,826	4,817
Tocantins	-0,798	0,113	0,434	-0,052	-0,899	0,826	-1,221
Maranhão	2,634	-0,176	0,283	-0,016	0,079	0,826	1,638
Piauí	-2,579	-0,562	0,228	-0,015	-1,006	0,826	-2,049
Ceará	-0,060	-0,614	0,583	0,009	-0,408	0,826	-0,457
Rio Grande do Norte	1,674	-0,475	0,588	0,000	-0,134	0,826	0,869
Paraíba	-2,035	-0,832	0,514	-0,068	-0,784	0,826	-1,691
Pernambuco	-1,390	-0,783	0,112	-0,086	-0,491	0,826	-0,969
Alagoas	-7,361	-0,275	0,166	0,118	-1,758	0,826	-6,440
Sergipe	-0,097	-0,361	0,673	0,019	-0,397	0,826	-0,857
Bahia	1,649	0,103	0,368	-0,058	-0,010	0,826	0,420
Minas Gerais	-2,426	-1,308	0,246	-0,198	-0,774	0,826	-1,219
Espírito Santo	1,123	0,138	0,383	-0,095	-0,089	0,826	-0,040
Rio de Janeiro	1,382	-0,654	0,471	-0,244	-0,223	0,826	1,206
São Paulo	1,544	-1,203	0,919	-0,034	0,034	0,826	1,002
Paraná	1,054	-1,839	0,452	0,036	0,266	0,826	1,313
Santa Catarina	1,509	-1,876	0,527	0,046	0,387	0,826	1,598
Rio Grande do Sul	2,023	-1,185	0,415	-0,004	0,455	0,826	1,516
Mato Grosso do Sul	1,523	-0,450	0,931	0,209	-0,158	0,826	0,166
Mato Grosso	-1,285	0,255	1,313	0,293	-1,387	0,826	-2,586
Goiás	-2,309	-0,343	0,640	-0,059	-1,214	0,826	-2,159
Distrito Federal	-0,603	0,103	-0,665	-0,291	-0,165	0,826	-0,411
Brasil*	-0,064	-0,415	0,404	-0,039	-0,395	0,826	-0,445

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*média aritmética

Observa-se que os resultados foram balanceados entre as UFs, sendo que 14 apresentaram variação positiva da PTF. Novamente, o componente tecnologia foi o principal fator que influenciou o crescimento da PTF, tendo também *OEI* e *OTEI* com papel importante na sustentação do crescimento, e o *SNI* foi responsável por uma parcela significativa da variação. Destaca-se que, para muitas UFs, o *OCI* teve um papel limitante, visto que apresentou variações negativas e elevadas, como é o caso de Minas Gerais, São Paulo e dos estados da região Sul. Para as UFs que apresentaram variações negativas na PTF, embora *OCI* e *OSEI* tenham contribuído para o resultado, o índice de eficiência técnica (*OTEI*) foi o principal componente limitador. Aqui, o *SNI* também foi responsável por uma parcela significativa da variação.

Na Tabela 14 estão as variações da PTF e de seus componentes no período entre 2006 e 2017. Nesse subperíodo observou-se uma taxa média de crescimento da PTF de 1,581% ao ano ao nível nacional, impulsionado por progresso técnico (*OTI*) e por ganhos de eficiência técnica (*OTEI*). Para as UFs que apresentaram expansão da PTF, o resultado é atribuído aos componentes *OTI* e *OTEI*. *OEI* e *OSEI* também contribuíram positivamente, mas não apresentaram comportamentos e magnitudes semelhantes entre as UFs. Já para as UFs que apresentaram variações negativas da PTF, *OTEI* e *OEI* foram os componentes que mais contribuíram para o resultado.

Tabela 14: Variação percentual da PTF e dos seus componentes por estado, 2006-2017

	TFPI	OCI	OEI	OSEI	OTEI	OTI	SNI
Acre	2,429	-0,310	-0,421	-0,129	0,688	0,826	1,774
Amazonas	2,525	-0,321	-0,548	-0,289	0,705	0,826	2,153
Roraima	6,826	-0,579	-0,444	-0,797	1,928	0,826	5,892
Pará	0,767	-0,279	-0,330	-0,174	0,300	0,826	0,424
Amapá	-4,514	-0,614	-0,660	0,071	-1,014	0,826	-3,122
Tocantins	2,548	-0,362	-0,066	-0,074	0,783	0,826	1,441
Maranhão	1,111	-1,008	-0,077	-0,117	0,782	0,826	0,705
Piauí	0,134	-0,282	0,114	-0,154	0,171	0,826	-0,541
Ceará	-2,815	-0,109	-0,517	-0,158	-0,483	0,826	-2,374
Rio Grande do Norte	-2,633	0,021	-0,594	-0,198	-0,296	0,826	-2,393
Paraíba	-1,203	0,176	-0,406	-0,250	-0,063	0,826	-1,486
Pernambuco	-2,180	-0,361	-0,052	-0,257	-0,302	0,826	-2,033
Alagoas	-0,045	-1,501	0,375	-0,129	0,343	0,826	0,041
Sergipe	3,958	-0,922	0,060	-0,032	0,810	0,826	3,215
Bahia	-2,108	-0,507	-0,045	-0,318	-0,260	0,826	-1,805
Minas Gerais	2,407	0,238	-0,134	-0,201	0,681	0,826	0,997
Espírito Santo	0,783	-0,231	-0,066	-0,138	0,113	0,826	0,279
Rio de Janeiro	-1,270	0,241	-0,423	-0,343	0,084	0,826	-1,654
São Paulo	2,234	0,853	-0,210	0,083	0,225	0,826	0,457
Paraná	2,571	1,736	-0,093	0,031	0,054	0,826	0,018
Santa Catarina	3,983	1,321	-0,283	-0,127	0,516	0,826	1,729
Rio Grande do Sul	4,974	1,026	-0,053	-0,075	0,856	0,826	2,394
Mato Grosso do Sul	5,517	1,184	0,462	0,371	0,708	0,826	1,966
Mato Grosso	9,297	-0,160	1,512	0,666	1,768	0,826	4,685
Goiás	6,003	-0,498	0,156	0,125	1,498	0,826	3,895
Distrito Federal	-0,183	-0,711	-0,486	-0,151	0,110	0,826	0,229
Brasil*	1,581	-0,075	-0,124	-0,106	0,412	0,826	0,649

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*média aritmética

Na Figura 10 estão as informações das variações da PTF para os períodos de 1995/96-2006, 2006-2017 e 1995/96-2017. Observa-se que, em linhas gerais, o subperíodo 2006-2017 possui uma contribuição mais significativa para o crescimento da PTF do que entre 1995/96 e 2017.



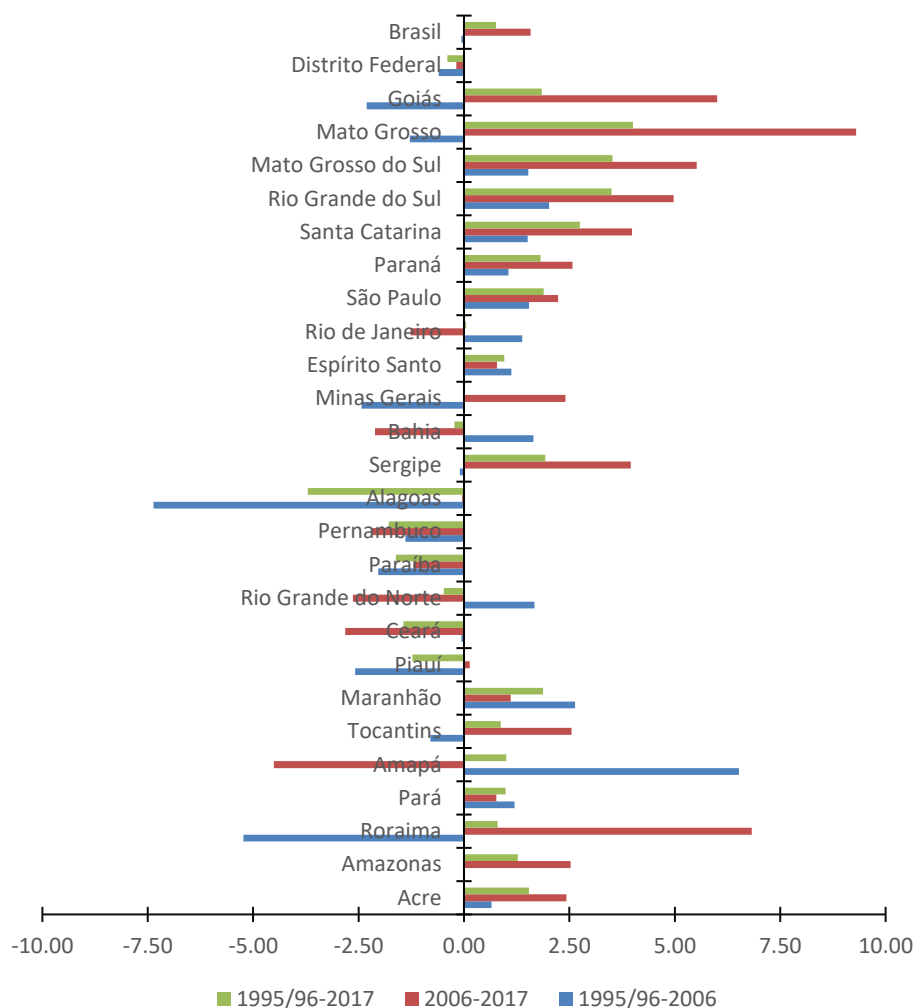


Figura 10: Variação percentual da PTF, por estado, nos períodos 1995/96-2006, 2006-2017 e 1995/96-2017  
 Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3. Impacto da adoção de práticas conservacionistas na produtividade do milho

Seguindo os mesmos procedimentos da seção anterior, para obter os resultados desta seção o primeiro passo consistiu em encontrar suporte para a especificação da fronteira estocástica do modelo 2, ou seja, verificar a existência do termo de ineficiência ( $u_{it}$ ). Ao analisar os resíduos estimados por MQO, constatou-se uma estatística de assimetria de -0,027, o que indica uma distribuição assimétrica à esquerda. Os testes propostos por D'agostino, Belanger e D'agostino Jr. (1990) e Coelli (1995) rejeitaram a hipótese nula de não haver assimetria nos resíduos da estimação por MQO, com um nível de significância de 1%. Diante desses resultados, procedeu-se à estimação da fronteira estocástica, em que o teste de Razão de Verossimilhança indicou um valor de 479,38. Esse resultado sugere que o modelo estimado por MQO foi rejeitado em favor do modelo estimado por meio de SFA<sup>16</sup>.

Os coeficientes estimados do modelo são apresentados na Tabela 15. Todos os parâmetros demonstraram significância estatística ao nível de 1%, e todas as condições de regularidade relacionadas às elasticidades foram

<sup>16</sup> O valor crítico da estatística ao nível de 1% de significância é 5,412.

satisfeitas. Além disso, a soma dos coeficientes das variáveis terra, capital, trabalho e despesas agrícolas foi igual a 1,08, indicando retornos crescentes à escala<sup>17</sup>. Este resultado é similar ao encontrado na subseção anterior.

Tabela 15: Resultados do modelo empírico, modelo 2

	Coeficientes	Erro padrão
ln(área)	0,904***	0,000458
ln(trabalho)	0,0184***	0,000794
ln(capital)	0,0537***	0,000525
ln(despesa)	0,103***	0,000443
<i>Dummy</i> capital	0,329***	0,00352
t	0,0728***	0,00115
ln(temperatura)	-0,520***	0,00978
ln(precipitação)	0,365***	0,00189
Anomalia temperatura	-0,0156***	0,000113
Anomalia precipitação	0,00322***	0,0000396
Sul	0,803***	0,00340
Centro-Oeste	0,612***	0,00423
Sudeste	0,526***	0,00249
Grupo de área 1	0,429***	0,00257
Grupo de área 2	0,506***	0,00422
Armazém	0,0855***	0,00136
Cooperativa	-0,0201***	0,000977
Assistência técnica	0,0924***	0,00137
Atividade principal (milho)	0,452***	0,00123
Plantio Direto	0,118***	0,00148
Rotação de Cultura	0,0463***	0,00124
Constante	5,651***	0,0328
Usigmas		
Constante	-1,697***	0,0305
Vsigmas		
Constante	-0,612***	0,00381
Total de observações		2698696
Log likelihood		-3159100,6
Wald chi2		17828156,2
Prob > chi2		0,0000

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*p<0,1; \*\* p<0,05; \*\*\* p<0,01

No contexto desse modelo, também se constatou que o insumo terra possui o maior potencial para impulsionar o aumento da produção de milho no Brasil, seguido pela despesa agrícola, capital e trabalho. Além disso, o coeficiente de tendência temporal (*t*) indica a presença de um progresso técnico de 0,64% ao ano. Quanto às outras variáveis, observou-se que todas apresentaram impactos semelhantes em termos de sinal e magnitude, conforme observado no modelo anterior (ver Tabela 10). O que diferencia este modelo do anterior é a incorporação das práticas agrícolas plantio direto e rotação de culturas. Assim, observa-se que a adoção destas práticas agrícolas conservacionistas está associada a maiores níveis de produção.

Em relação à eficiência técnica, constatou-se que nos estabelecimentos analisados a média foi de 72,28%, com variações entre 32,86% e 87,92%. Isso significa que, em média, os produtores de milho conseguem produzir apenas 72,28% do máximo potencial possível, o que representa aproximadamente 27% de perda devido à ineficiência

<sup>17</sup> A hipótese de retornos constantes à escala foi rejeitada com base no teste de Wald, com um nível de significância de 1%.

técnica. Ao longo do período analisado não foram observadas mudanças significativas nas médias anuais<sup>18</sup>, mas as UFs apresentaram comportamentos heterogêneos. Na Tabela 16 estão as médias das eficiências técnicas no período entre 2006 e 2017 para o Brasil e para as UFs.

Tabela 16: Médias das eficiências técnicas no período entre 2006 e 2017 e as médias anuais para o Brasil e para as Unidades da Federação

	2006	2017	2006-2017
Rondônia		0,772	0,772
Acre	0,766	0,788	0,780
Amazonas	0,758	0,772	0,767
Roraima	0,728	0,790	0,774
Pará	0,733	0,743	0,739
Amapá	0,776	0,742	0,745
Tocantins	0,747	0,771	0,762
Maranhão	0,730	0,747	0,739
Piauí	0,722	0,721	0,722
Ceará	0,741	0,727	0,733
Rio Grande do Norte	0,719	0,704	0,712
Paraíba	0,722	0,718	0,720
Pernambuco	0,738	0,726	0,732
Alagoas	0,731	0,739	0,735
Sergipe	0,752	0,783	0,764
Bahia	0,734	0,724	0,730
Minas Gerais	0,719	0,734	0,726
Espírito Santo	0,738	0,742	0,740
Rio de Janeiro	0,738	0,733	0,736
São Paulo	0,752	0,751	0,752
Paraná	0,740	0,733	0,737
Santa Catarina	0,743	0,756	0,749
Rio Grande do Sul	0,720	0,744	0,730
Mato Grosso do Sul	0,726	0,740	0,734
Mato Grosso	0,692	0,736	0,718
Goiás	0,718	0,759	0,739
Distrito Federal	0,731	0,736	0,734
Brasil	0,731	0,734	0,733

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 11 exhibe a distribuição espacial da eficiência técnica média em nível municipal durante o período de 2006 a 2017. Da mesma forma que no modelo anterior, não é possível identificar um padrão claro de regiões com alta eficiência técnica. No entanto, é importante ressaltar os valores médios elevados observados nos municípios da região Norte.

<sup>18</sup> No Apêndice B, apresenta-se o histograma das eficiências técnicas do período entre 2006 e 2017 e para os anos censitários.

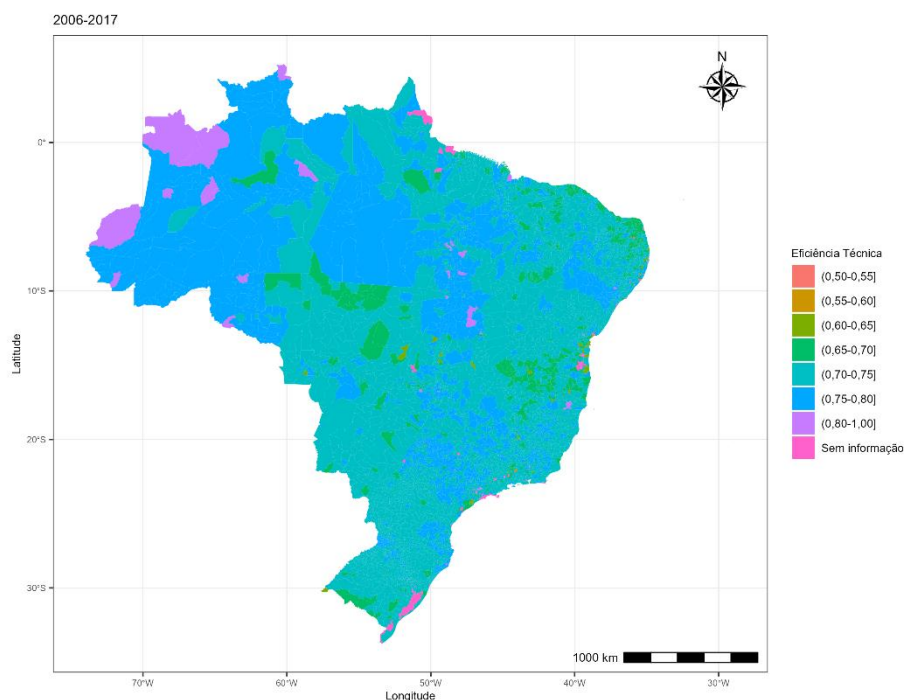


Figura 11: Distribuição espacial das eficiências técnicas médias por município no período entre 2006 e 2017  
 Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.3.1. Análise da produtividade<sup>19</sup>

A Tabela 17 apresenta as variações percentuais da PTF e de seus componentes obtidos a partir da eq. (19) no período entre 2006 e 2017, em que o crescimento da produtividade dos estabelecimentos produtores de milho no período foi, em média, de 1,089%, variando entre -6,191% em Amapá e 8,621% no Mato Grosso. O principal determinante do crescimento da PTF durante o período foi o progresso técnico, que cresceu a uma taxa média de 0,662% ao ano, seguido pelos índices que capturam mudanças de eficiência técnica (0,134% a.a.), de condições climáticas (0,103% a.a.), e da adoção das práticas agrícolas conservacionistas (0,093% a.a.). Os índices ambiental e de escala tiveram um papel limitante do crescimento da produtividade. Por fim, o *SNI*, que captura flutuações na PTF devido a fatores não identificados, teve uma média de 0,609%.

<sup>19</sup> Nesta discussão se desconsidera os produtores do estado de Rondônia, visto que, segundo dos dados dos Censos Agropecuários, não houve produção de milho em 2006.

Tabela 17: Variação percentual da PTF e dos seus componentes por estado, 2006-2017

	IPTF	OCI	OEI	OSEI	OTEI	OTI	OPI	SNI
Acre	2,065	-0,381	-0,448	-0,154	0,283	0,662	-0,134	2,235
Amazonas	1,075	-0,226	-0,570	-0,398	0,184	0,662	0,036	1,385
Roraima	5,966	-0,402	-0,338	-1,186	0,769	0,662	0,064	6,395
Pará	0,664	-0,151	-0,427	-0,262	0,129	0,662	0,022	0,691
Amapá	-6,191	-0,600	-1,615	-0,162	-0,425	0,662	0,180	-4,232
Tocantins	2,635	-0,185	-0,103	-0,188	0,320	0,662	0,043	2,087
Maranhão	0,928	-0,999	0,343	-0,214	0,249	0,662	0,028	0,857
Piauí	-0,500	-0,323	0,361	-0,258	0,006	0,662	-0,053	-0,896
Ceará	-3,895	-0,151	-1,766	-0,193	-0,167	0,662	-0,019	-2,261
Rio Grande do Norte	-2,597	0,040	-0,076	-0,347	-0,162	0,662	0,082	-2,797
Paraíba	-2,026	0,265	-1,152	-0,375	-0,021	0,662	0,038	-1,443
Pernambuco	-2,215	-0,388	0,410	-0,446	-0,133	0,662	0,061	-2,380
Alagoas	0,546	-1,919	1,668	-0,261	0,125	0,662	0,024	0,248
Sergipe	3,154	-1,151	-0,923	0,011	0,378	0,662	0,012	4,165
Bahia	-2,662	-0,554	0,108	-0,552	-0,118	0,662	0,016	-2,225
Minas Gerais	1,849	0,564	-0,254	-0,343	0,215	0,662	0,131	0,875
Espírito Santo	0,107	-0,037	-0,707	-0,187	0,043	0,662	0,080	0,253
Rio de Janeiro	-1,887	0,643	-0,780	-0,548	-0,027	0,662	0,160	-1,997
São Paulo	1,793	1,604	-0,730	0,167	0,000	0,662	0,275	-0,185
Paraná	2,265	2,642	-0,393	0,067	-0,083	0,662	0,216	-0,846
Santa Catarina	3,570	2,142	-0,622	-0,186	0,170	0,662	0,124	1,280
Rio Grande do Sul	4,637	1,642	-0,372	-0,106	0,313	0,662	0,119	2,377
Mato Grosso do Sul	5,260	1,771	-0,116	0,655	0,189	0,662	0,203	1,896
Mato Grosso	8,621	0,003	0,460	1,057	0,610	0,662	0,440	5,388
Goiás	5,860	-0,425	0,032	0,218	0,561	0,662	0,247	4,566
Distrito Federal	-0,718	-0,749	-0,904	-0,218	0,068	0,662	0,019	0,403
Brasil*	1,089	0,103	-0,343	-0,170	0,134	0,662	0,093	0,609

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: \*média aritmética

Assim como para os demais índices, o *OPI* impacta de forma heterogênea as UFs brasileiras, sendo que apenas no Acre, Piauí e Ceará houve impacto negativo estimado do índice no crescimento da PTF. Este resultado está, em partes, relacionado à redução no número de estabelecimentos que adotavam o plantio direto, uma vez que se observou um maior número de estabelecimentos adotantes da rotação de cultura no período analisado, e uma maior área com plantio direto.

Destaca-se ainda o resultado do Mato Grosso, estado onde houve aumento do número de adotantes das referidas práticas. Em 2006, 2.616 e 2.223 estabelecimentos agropecuários produtores de milho do estado adotavam o plantio direto e a rotação de cultura, respectivamente, alcançando, em 2017, 5.887 e 5.757 estabelecimentos, respectivamente. O *OPI* captou esse impacto sobre o crescimento da produtividade no estado.

O plantio direto é um sistema de cultivo conservacionista que envolve o não revolvimento do solo e a cobertura com material orgânico, favorecendo o desenvolvimento sustentável da agricultura, preservando a estrutura física e biológica do solo e reduzindo a suscetibilidade à erosão. Segundo Soares (2017) e Soares e Spolador (2019), a adoção de plantio direto contribuiu para os ganhos de eficiência técnica e para a redução de *gap* tecnológicos. De acordo com Oliveira et al. (2009), a adoção do plantio direto no cultivo de milho apresentou benefícios significativos, permitindo a redução do maquinário necessário para o preparo do solo, e da quantidade de trabalho relacionada ao controle e monitoramento de pragas e doenças. Além disso, segundo os autores, esta prática demonstrou um aumento da produtividade média em comparação aos sistemas convencionais de cultivo, destacando o potencial da

prática como uma estratégia eficaz para otimizar recursos, reduzir custos e melhorar o desempenho produtivo do milho.

Por sua vez, a rotação de culturas é uma prática essencial para aumentar a estabilidade da produção agrícola, proporcionando diversos benefícios. Em primeiro lugar, essa técnica melhora a qualidade do solo e promove a produção de cobertura, contribuindo para a saúde e fertilidade do terreno. Além disso, a rotação de culturas permite a diversificação de variedades cultivadas e o escalonamento das épocas de semeadura, o que ajuda a mitigar os efeitos das variações climáticas. Outra vantagem é a redução dos custos de produção, já que há uma racionalização no uso de insumos, como fertilizantes e agrotóxicos, além da otimização dos recursos disponíveis, como máquinas, equipamentos e mão de obra (FORTINI; BRAGA; FREITAS, 2020; FRANCHINI et al., 2011).

Apesar desses benefícios, há uma baixa adesão dessas práticas na cultura do milho no Brasil (ver Tabela 9), o que pode estar relacionado com o fato de que a produção de milho se concentra em pequenos estabelecimentos agropecuários, inviabilizando a adoção/implementação das práticas. Ademais, embora não seja possível confirmar no presente estudo, tem-se por hipótese que a baixa adesão está relacionada à resistência a mudanças por parte dos produtores rurais devido ao montante investimento inicial necessário, às condições climáticas e ambientais desfavoráveis à implementação e à falta de infraestrutura e assistência técnica.

Diversos autores relacionaram o ganho de produtividade da cultura à adoção de melhores práticas agrícolas (ALVES et al., 2018; BAHIA FILHO et al., 2008; CONTINI et al., 2010). Além do plantio direto e a rotação de culturas, adicionalmente existem outras técnicas como manejo integrado de pragas, irrigação eficiente, manejo adequado de nutrientes, que, se adotadas e implementadas adequadamente, podem resultar em maior eficiência e rendimento da produção de milho.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa analisou a evolução da PTF da produção brasileira de milho entre os períodos de 1995/96 a 2017 utilizando os microdados censitários e as variáveis do banco de dados disponibilizado pelo grupo THRG da Universidade de Princeton. Durante o período analisado, a lavoura de milho apresentou um aumento médio da produtividade anual de 0,76%. O principal determinante do crescimento foi o progresso técnico, reflexo do desenvolvimento e uso de novas tecnologias na produção do grão. Os índices que explicam as mudanças da produtividade devido a fatores observados e não observados relacionados ao ambiente de produção e de eficiência técnica também impactaram positivamente a produtividade, embora em menor magnitude. Por outro lado, na média, os ganhos de escala e mudanças das condições climáticas tiveram um papel limitador, impactando negativamente a PTF.

O processo de evolução da produtividade não ocorreu de forma uniforme em todas as UFs do Brasil. Em algumas UFs o crescimento da produtividade foi positivo, acompanhando o comportamento observado para o Brasil como um todo, enquanto em outras o crescimento foi negativo. Essa conclusão sobre a disparidade entre regiões e estados era esperada dada a heterogeneidade do processo produtivo adotado pelos estabelecimentos, e as condições edafoclimáticas específicas.

Adicionalmente, a pesquisa se propôs a avaliar o impacto da adoção das práticas plantio direto e rotação de culturas na PTF do milho entre 2006 e 2017. Embora estas práticas possuam um impacto positivo na produção do grão, observou-se um efeito reduzido sobre o crescimento da produtividade, quando comparado a outros determinantes. Novamente, houve certa heterogeneidade entre as UFs, de tal forma que UFs onde se observou uma maior proporção de estabelecimentos que adotaram estas práticas experimentaram impactos médios mais significativos se comparados aos que possuíam uma menor proporção de adotantes.

Evidências sobre eficiência técnica, progresso técnico e produtividade ao longo do tempo são alguns dos principais indicadores que os tomadores de decisão necessitam para estabelecer políticas para lavouras específicas e para o setor agrícola como um todo, razão pelo qual a análise das mudanças nestes indicadores é uma das condições necessárias para identificar causas da ineficiência e possibilidades de ganhos de produtividade ao longo do tempo. Por fim, os resultados permitem concluir que a taxa de crescimento da PTF tem papel significativo no crescimento da lavoura do milho, especialmente quando se trata de incorporação e adoção de tecnologias.

No entanto, é importante ressaltar algumas limitações encontradas durante a realização do estudo. Primeiramente, dada a heterogeneidade produtiva da cultura do milho no Brasil, as condições específicas de cada região e de cada ambiente produtivo como clima, solo e práticas agrícolas locais podem influenciar significativamente os resultados. Ademais, capacidades gerenciais, tecnologias empregadas, condições de mercado e políticas governamentais também possuem impacto substancial na produtividade. Nesse sentido, a identificação das safras (primeira e segunda safras), da finalidade da produção, dos sistemas de produção e das tecnologias empregadas (sementes, fertilizantes, defensivos etc.) contribuiria para o aperfeiçoamento dos modelos estimados e, por consequência, dos resultados encontrados.

Quanto à identificação das safras, dado a forma como as perguntas dos Censos Agropecuários foram elaboradas, há uma dificuldade na separação da produção de milho do estabelecimento entre primeira e segunda safras, sendo o processo, portanto, arbitrário. O que poderia ajudar nessa caracterização seria a identificação do sistema de produção empregado no estabelecimento, sendo composto pelo conjunto de sistemas de cultivo definido



a partir dos fatores de produção utilizados, e pela gestão implementada podendo ser classificados como: sistema de monocultura; sistema em sucessão de culturas; sistema em rotação de culturas; sistema em consorciação de culturas; e sistema integração. No presente estudo, também não se identificou os sistemas de produção empregados nos estabelecimentos agropecuários

Outra informação importante diz respeito à finalidade da produção, sendo que apenas o Censo Agropecuário de 2017 que identificou a finalidade para consumo próprio ou para comercialização da produção, optando-se por desconsiderá-la. Complementarmente, houve dificuldade em capturar a qualidade dos insumos consideradas na análise e de capturar a utilização de insumos específicos importantes para a lavoura do milho como sementes, fertilizantes e defensivos. Com relação a estes, destaca-se que os Censos Agropecuários consideram o valor gasto com estes itens no estabelecimento sem desagregá-los por atividade.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se o aperfeiçoamento e a incorporação destas variáveis visto que isso possibilitará capturar e controlar melhor a heterogeneidade produtiva da produção de milho no Brasil e, por consequência, o aprimoramento dos resultados encontrados. Ademais, dado que o crescimento da produtividade não ocorreu de forma homogênea entre as UFs, seria interessante desenvolver estudos que aprofundam sobre a dinâmica do crescimento da PTF da lavoura, investigando a hipótese de convergência da produtividade.

Concomitantemente, uma abordagem interessante seria a realização de análises de produtividade para as diferentes regiões (ou até estados) brasileiras, sendo possível capturar e controlar com mais precisão especificidades locais e compreender os fatores que influenciam a produtividade do milho em contextos diversos. Além disso, seria relevante investigar o impacto de novas tecnologias e práticas agrícolas sustentáveis na produtividade da lavoura do milho. O desenvolvimento de técnicas de manejo mais eficientes, o uso de fertilizantes de liberação controlada, a utilização da agricultura de precisão e a implementação de sementes melhoradas são apenas algumas das possibilidades a serem exploradas.

## REFERÊNCIAS

- AIGNER, D.; LOVELL, C. A. K.; SCHMIDT, P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, v. 6, n. 1, p. 21–37, jul. 1977.
- ALBUQUERQUE, A. C. S.; DA SILVA, A. G. **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008., 2008.
- ALVES, E. R. DE A.; CONTINI, E.; GASQUES, J. G. Evolução da produção e produtividade da agricultura brasileira. Em: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. DA (Ed.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília - DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 67–100.
- ALVES, L. R. A. et al. Estrutura de Mercado e Formação de Preços na Cadeia Produtiva de Milho. Em: ALVES, L. R. A.; BACHA, C. J. C. (Eds.). **Panorama da agricultura brasileira**. Campinas - SP: Alínea, 2018. p. 133–176.
- ALVES, L. R. A.; BACHA, C. J. C. **Panorama da agricultura brasileira: estrutura de mercado, comercialização, formação de preços, custos de produção e sistemas produtivos**. Campinas - SP: Alínea, 2018.
- ARTUZO, F. D. et al. O potencial produtivo brasileiro: uma análise histórica da produção de milho. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 12, n. 2, p. 515, 14 maio 2019.
- BACHA, C. J. C. **Economia e Política Agrícola no Brasil**. Campinas - SP: Alínea, 2018.
- BAHIA FILHO, A. F. C. et al. Impulsionando a produção e a produtividade de milho e sorgo, no Brasil. Em: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. DA (Ed.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília - DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 125–162.
- BALDOS, U. L. C.; HERTEL, T. W. Global food security in 2050: the role of agricultural productivity and climate change. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, v. 58, n. 4, p. 554–570, out. 2014.
- BARRETT, C. B. Overcoming Global Food Security Challenges through Science and Solidarity. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 103, n. 2, p. 422–447, 27 mar. 2021.
- BARRIOS, S.; BERTINELLI, L.; STROBL, E. Trends in rainfall and economic growth in Africa: a neglected cause of the African growth tragedy. *The Review of Economics and Statistics*, v. 92, n. 2, p. 350–366, 2010.
- BARROS, A. L. M. DE. **Capital, produtividade e crescimento da agricultura: o Brasil de 1970 a 1995**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 20 dez. 1999.
- BATTESE, G. E. A note on the estimation of Cobb-Douglas production functions when some explanatory variables have zero values. *Journal of Agricultural Economics*, v. 48, n. 1–3, p. 250–252, jan. 1997.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014.
- BESEN, M. et al. Soil conservation practices and greenhouse gases emissions in Brazil. *Scientia Agropecuaria*, v. 9, n. 3, p. 429–439, 28 set. 2018.
- BOLFE, É. L. et al. MATOPIBA em Crescimento Agrícola. *Revista de Política Agrícola*, v. 1, n. 4, p. 38–62, 2016.
- BONELLI, R.; FONSECA, R. Ganhos de produtividade e de eficiência: novos resultados para a economia brasileira. *Texto para Discussão*, v. 557, p. 1, 1998.

BRAGAGNOLO, C.; SPOLADOR, H. F. S.; BARROS, G. S. DE C. Regional Brazilian agriculture TFP analysis: a stochastic frontier analysis approach. **Revista Economia**, v. 11, n. 4, p. 217–242, 2010.

BRAGAGNOLO, C.; SPOLADOR, H. F. S.; BARROS, G. S. DE C. PTF agrícola: Atualização segundo o Censo de 2017. **Revista de Política Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 107–122, 2021.

BRASIL. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Brasília - DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf>>.

Acesso em: 2 maio. 2022.

BRASIL. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária 2020-2030: plano operacional**. Brasília - DF: MAPA, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/final-isbn-plano-setorial-para-adaptacao-a-mudanca-do-clima-e-baixa-emissao-de-carbono-na-agropecuaria-compactado.pdf>>. Acesso em: 2 maio. 2022.

BUAINAIN, A. M.; DEDECCA, C. S. Mudanças e reiteração da heterogeneidade do mercado de trabalho agrícola. Em: GASQUES, J. G.; VIEIRA FILHO, J. E.; NAVARRO, Z. (Eds.). **A agricultura brasileira: desempenho, desafios e perspectivas**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Ipea, 2010. p. 123–153.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA. **PIB cadeia do milho**. Piracicaba: [s.n.]. Disponível em: <[https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cadeia-milho\\_A\(1\).pdf](https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cadeia-milho_A(1).pdf)>. Acesso em: 2 maio. 2022.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA. **PIB Agronegócio brasileiro**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA; FUNDAÇÃO DE ESTUDOS AGRÁRIOS LUIZ DE QUEIROZ - FEALQ. **Mercado de trabalho do agronegócio brasileiro**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/mercado-de-trabalho-do-agronegocio.aspx>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

CHADDAD, F. **Economia e organização da agricultura brasileira**. [s.l.] Elsevier Brasil, 2017.

COELLI, T. Estimators and hypothesis tests for a stochastic frontier function: A Monte Carlo analysis. **The Journal of Productivity Analysis**, v. 6, p. 247–268, 1995.

COELLI, T. J. et al. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. 2. ed. New York: Springer, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Calendário de plantio e colheita de grãos no Brasil 2022**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/outras-publicacoes/item/15406-calendario-agricola-plantio-e-colheita>>. Acesso em: 8 set. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Série histórica das safras**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

CONCEIÇÃO, P. H. Z. DA. **Produtividade total e mudança técnica na agricultura brasileira, período 1955-1994**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 11 jan. 1998.

CONTINI, E. et al. Dinamismo da agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, p. 42–64, 2010.

- COSTA, R. A.; VIZCAINO, C. A. C.; COSTA, E. M. Participação em cooperativas e eficiência técnica entre agricultores familiares no Brasil. Em: **Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Ipea, 2020. p. 243–255.
- D’AGOSTINO, R. B.; BELANGER, A.; D’AGOSTINO JR., R. B. A Suggestion for Using Powerful and Informative Tests of Normality. **The American Statistician**, v. 44, n. 4, p. 316–321, nov. 1990.
- DANELON, A. F.; SPOLADOR, H. F. S.; BERGTOLD, J. S. The role of productivity and efficiency gains in the sugar-ethanol industry to reduce land expansion for sugarcane fields in Brazil. **Energy Policy**, v. 172, 1 jan. 2023.
- DELGROSSI, M. E.; BALSADI, O. V. Mercado de trabalho e agricultura no Brasil contemporâneo. Em: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (Eds.). **Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Ipea, 2020. p. 205–218.
- ERENSTEIN, O. et al. Conservation Agriculture in Maize- and Wheat-Based Systems in the (Sub)tropics: Lessons from Adaptation Initiatives in South Asia, Mexico, and Southern Africa. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 36, n. 2, p. 180–206, fev. 2012.
- FEIX, R. D.; MIRANDA, S. H. G. DE; BARROS, G. S. DE C. Comércio internacional, agricultura e meio ambiente: teorias, evidências e controvérsias empíricas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, p. 605–634, 2010.
- FELEMA, J.; SPOLADOR, H. F. S. Características regionais da produtividade e da mecanização da agropecuária brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 37–51, 2022.
- FELEMA, J.; SPOLADOR, H. F. S. Decomposição espacial do crescimento da Produtividade Total dos Fatores (PTF) da agropecuária brasileira. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 3, p. 1–19, mar. 2023.
- FERREIRA, M. D. P.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Eficiência técnica na agropecuária: capacidade de armazenagem e densidade das rodovias. Em: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (Eds.). **Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Ipea, 2020. p. 161–172.
- FORTINI, R. M.; BRAGA, M. J.; FREITAS, C. O. Impacto das práticas agrícolas conservacionistas na produtividade da terra e no lucro dos estabelecimentos agropecuários brasileiros. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 58, n. 2, 2020.
- FRANCHINI, J. C. et al. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**: Documentos. Londrina - PR: Embrapa Soja, 2011.
- FRIEDRICH, T. et al. Overview of the Global Spread of Conservation Agriculture. <http://journals.openedition.org/factsreports>, n. Special Issue 6, 20 jun. 2012.
- FUGLIE, K. O. Is agricultural productivity slowing? **Global Food Security**, v. 17, p. 73–83, jun. 2018.
- FUGLIE, K.; SCHIMMELPFENNIG, D. Introduction to the special issue on agricultural productivity growth: a closer look at large, developing countries. **Journal of Productivity Analysis**, v. 33, n. 3, p. 169–172, 19 jun. 2010.
- FULGINITI, L. Agricultural productivity in developing countries. **Agricultural Economics**, v. 19, n. 1–2, p. 45–51, 1 set. 1998.
- FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS - FGV. **Índice geral de preços - disponibilidade interna - IGP-DI**. Disponível em: <<https://portalibre.fgv.br/>>. Acesso em: 18 mar. 2022.
- GALVÃO, J. C. C.; TROGELLO, E.; PEREIRA, L. P. L. Milho Segunda Safra. Em: BORÉM, A.; GALVÃO, J. C. C. G.; PIMENTEL, M. A. (Eds.). **Milho: do plantio à colheita**. Viçosa - MG: Editora UFV, 2015. p. 207–223.

GASQUES, J. G. et al. Condicionantes da produtividade da agropecuária brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 13, n. 3, p. 73–90, 2004.

GASQUES, J. G. et al. Produtividade Total dos Fatores e Transformações da Agricultura Brasileira: análise dos dados dos Censos Agropecuários. Em: GASQUES, J. G.; VIEIRA FILHO, J. E. R.; NAVARRO, Z. (Eds.). **A agricultura Brasileira: desempenho, desafios e perspectivas**. Brasília - DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2010. p. 19–44.

GASQUES, J. G. et al. Produtividade da agricultura brasileira e os efeitos de algumas políticas. **Revista de Política Agrícola**, v. 21, n. 3, p. 83–92, 2012.

GASQUES, J. G. et al. Produtividade da agricultura: resultados para o Brasil e estados selecionados. **Revista de Política Agrícola**, v. 23, n. 3, p. 87–98, 2014.

GASQUES, J. G. et al. Produtividade da agricultura brasileira: a hipótese da desaceleração. Em: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (Eds.). **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília - DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2016. p. 143–164.

GASQUES, J. G. et al. Crescimento e produtividade da agricultura brasileira: uma análise do Censo Agropecuário. Em: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (Eds.). **Uma jornada pelos contrastes do Brasil: Cem anos do Censo Agropecuário**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2020. p. 107–119.

GASQUES, J. G. et al. Produtividade total dos fatores na agricultura – Brasil e países selecionados. **Texto para Discussão**, v. 2764, p. 1–20, 2 jun. 2022.

GASQUES, J. G.; CONCEIÇÃO, J. C. P. R. DA. Crescimento e produtividade da agricultura brasileira. **Texto para Discussão**, p. 1–28, 1997.

GASQUES, J. G.; CONCEIÇÃO, J. C. P. R. DA. Transformações estruturais da agricultura e produtividade total dos fatores. **Texto para Discussão**, v. 768, p. 1–62, 2000.

GASQUES, J. G. G.; BASTOS, E. T.; BACCHI, M. R. P. Produtividade e fontes de crescimento da agricultura brasileira. Em: DE NEGRI, J. A.; KUBOTA, L. C. (Eds.). **Políticas de Incentivo à Inovação Tecnológica no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2008. p. 1–612.

HEDLUND, J. et al. Environmental impacts of food trade via resource use and greenhouse gas emissions. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 3, p. 035012, 4 mar. 2016.

HUYNH, H. T. et al. Influences of soil tillage, irrigation and crop rotation on maize biomass yield in a 9-year field study in Müncheberg, Germany. **Field Crops Research**, v. 241, p. 107565, 1 set. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Agrícola Municipal - PAM 2021**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/66/pam\\_2021\\_v48\\_br\\_informativo.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/66/pam_2021_v48_br_informativo.pdf)>. Acesso em: 30 abr. 2023.

JAT, R. K. et al. Seven years of conservation agriculture in a rice–wheat rotation of Eastern Gangetic Plains of South Asia: Yield trends and economic profitability. **Field Crops Research**, v. 164, n. 1, p. 199–210, 1 ago. 2014.

KUMAR, V. et al. Effect of different tillage and seeding methods on energy use efficiency and productivity of wheat in the Indo-Gangetic Plains. **Field Crops Research**, v. 142, p. 1–8, fev. 2013.

KUMBHAKAR, S. C.; LOVELL, C. A. K. **Stochastic Frontier Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

KUMBHAKAR, S. C.; WANG, H.-J.; HORNCastle, A. P. **A practitioner's guide to stochastic frontier analysis using Stata**. [s.l.] Cambridge University Press, 2015.

- LACHAUD, M. A.; BRAVO-URETA, B. E. Agricultural productivity growth in Latin America and the Caribbean: an analysis of climatic effects, catch-up and convergence. **Australian Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 65, n. 1, p. 143–170, 23 jan. 2021.
- LACHAUD, M. A.; BRAVO-URETA, B. E.; LUDENA, C. E. Agricultural productivity in Latin America and the Caribbean in the presence of unobserved heterogeneity and climatic effects. **Climatic Change**, v. 143, n. 3–4, p. 445–460, 1 ago. 2017.
- LACHAUD, M. A.; BRAVO-URETA, B. E.; LUDENA, C. E. Economic effects of climate change on agricultural production and productivity in Latin America and the Caribbean (LAC). **Agricultural Economics**, v. 53, n. 2, p. 321–332, 9 mar. 2022.
- LÁZARI, N. C. DE; MAGALHÃES, M. M. DE. Crescimento da PTF segundo tamanho de estabelecimentos rurais na região Sudeste, de 1985 a 2006. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, n. 2, p. 198–214, jun. 2019.
- MACHADO, G. C.; BACHA, C. J. C.; JOHNSTON, F. L. Revisão sistemática dos trabalhos que calculam a PTF da agropecuária brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 29, n. 1, p. 82–93, 2020.
- MARINHO, E. L. L.; CARVALHO, R. M. Comparações inter-regionais da produtividade da agricultura brasileira:—1970-1995. 2004.
- MARTINS, M. M.; SPOLADOR, H. F. S.; NJUKI, E. Production environment and managerial techniques in explaining productivity growth in Brazilian beef cattle production. **Agribusiness**, v. 38, n. 2, p. 371–385, 1 abr. 2022.
- MCLAUGHLIN, A.; MINEAU, P. The impact of agricultural practices on biodiversity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 55, n. 3, p. 201–212, 1995.
- MEEUSEN, W.; VAN DEN BROECK, J. Technical efficiency and dimension of the firm: Some results on the use of frontier production functions. **Empirical economics**, v. 2, n. 2, p. 109–122, 1977.
- MELLO, P. C. DE; ROCHA, M. T. Desenvolvimento sustentável: o equilíbrio entre a preservação do meio ambiente e o manejo de terras para a agricultura. Em: KHALILI, A. EL; TEIXEIRA, A. C. (Eds.). **A questão ambiental: desenvolvimento e sustentabilidade**. Rio de Janeiro - RJ: Fundação Escola Nacional de Seguros - FUNENSEG, 2004. p. 240.
- MENDES, G. M. **Efeitos dos ganhos de produtividade total dos fatores da agropecuária sobre os preços agrícolas no Brasil: 1970-2006**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 11 set. 2015.
- MESSA, A. Indicadores de produtividade: uma breve revisão dos principais métodos de cálculo. **Radar**, p. 17–26, 2013.
- MINISTÉRIO DE AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Indicadores Gerais Agrostat**. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/index.htm>>. Acesso em: 31 ago. 2019.
- MÔRO, G. V.; FRITSCHÉ-NETO, R. Importância e usos do milho no Brasil. Em: BORÉM, A.; GALVÃO, J. C. C. G.; PIMENTEL, M. A. (Eds.). **Milho: do plantio à colheira**. Viçosa - MG: Editora UFV, 2015. p. 9–25.
- NEVES, M. DE C. R.; CASTRO, L. S. DE; FREITAS, C. O. DE. O impacto das cooperativas na produção agropecuária brasileira: uma análise econométrica espacial. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, n. 4, p. 559–576, dez. 2019.
- NJUKI, E.; BRAVO-URETA, B. E.; O'DONNELL, C. J. Decomposing agricultural productivity growth using a random-parameters stochastic production frontier. **Empirical Economics**, v. 57, n. 3, p. 839–860, 30 set. 2019.
- O'DONNELL, C. J. An aggregate quantity framework for measuring and decomposing productivity change. **Journal of Productivity Analysis**, v. 38, n. 3, p. 255–272, 3 dez. 2012.

O'DONNELL, C. J. Using information about technologies, markets and firm behaviour to decompose a proper productivity index. **Journal of Econometrics**, v. 190, n. 2, p. 328–340, 1 fev. 2016.

O'DONNELL, C. J. **Productivity and Efficiency Analysis**. Singapore: Springer Singapore, 2018.

OLIVEIRA, M. N. et al. Efeitos da introdução do sistema de plantio direto de milho por agricultores familiares do município de Unaí, MG (cerrado brasileiro). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 1, p. 51–60, 2009.

PARAJULI, P. B. et al. Assessing the impacts of climate change and tillage practices on stream flow, crop and sediment yields from the Mississippi River Basin. **Agricultural Water Management**, v. 168, p. 112–124, 1 abr. 2016.

PEREIRA, M. F. et al. Productivity growth and technological progress in the Brazilian agricultural sector. **Pesquisa Operacional**, v. 22, n. 2, p. 133–146, dez. 2002.

PITTELKOW, C. M. et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. **Nature**, v. 517, n. 7534, p. 365–368, 15 jan. 2015.

RADA, N. E.; BUCCOLA, S. T. Agricultural policy and productivity: evidence from Brazilian censuses. **Agricultural Economics**, v. 43, n. 4, p. 355–367, jul. 2012.

SANCHES, A. L. R.; ALVES, L. R. A.; BARROS, G. S. DE C. Oferta e demanda mensal de milho no Brasil: impactos da segunda safra. **Revista de Política Agrícola**, v. 27, n. 4, p. 73–97, 2018.

SAPKOTA, T. B. et al. Climate change adaptation, greenhouse gas mitigation and economic profitability of conservation agriculture: Some examples from cereal systems of Indo-Gangetic Plains. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 8, p. 1524–1533, 1 ago. 2015.

SHEFFIELD, J.; GOTETI, G.; WOOD, E. F. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. **Journal of climate**, v. 19, n. 13, p. 3088–3111, 2006.

SILVA, R. P.; BARICELO, L. G.; VIAN, C. E. DE F. Evolução, composição e distribuição regional do estoque de tratores e máquinas agrícolas no Brasil. Em: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (Eds.). **Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica - Ipea, 2020. p. 149–160.

SOARES, P. **Determinantes de eficiência técnica da agricultura: um estudo para as culturas de milho e soja no Brasil**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 14 jun. 2017.

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

SOLOW, R. M. A contribution to the theory of economic growth. **The quarterly journal of economics**, v. 70, n. 1, p. 65–94, 1956.

SOUZA, R. O. DE; TEIXEIRA, S. M. Produtividade total dos fatores na agricultura goiana: uma análise para as culturas de cana-de-açúcar, milho e soja. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 11, n. 2, 2014.

SOUZA, G. DA S.; GOMES, E. G.; ALVES, E. R. DE A. Uma visão da produção da agricultura brasileira com base em dados recentes do Censo Agropecuário. Em: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (Eds.). **Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Ipea, 2020. p. 39–50.

TURRA, S. **Evolução da produtividade total dos fatores do milho nas mesorregiões do estado do Paraná - Brasil**. Tese—Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2019.

VARIAN, H. R. **Microeconomic analysis**. 3rd. ed. [s.l.] Norton & Company, 2010.

VICENTE, J. R. Mudança tecnológica, eficiência, produtividade total de fatores na agricultura brasileira, 1970-95. **Economia Aplicada**, v. 8, n. 4, p. 729–760, 2004.

VICENTE, J. R. **Impactos da pesquisa agropecuária sobre a produtividade total de fatores: avaliação de cultivares de amendoim utilizando DEA e índices de Malmquist**. XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. **Anais...**Porto Seguro: XLI SBPO 2009 - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento, 2009.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

YANO, R. H. **Análise da evolução da produtividade total dos fatores na produção de frangos e suínos no Brasil**. Dissertação—São Paulo: Fundação Getulio Vargas, 2020.



## APÊNDICES

## APÊNDICE A.

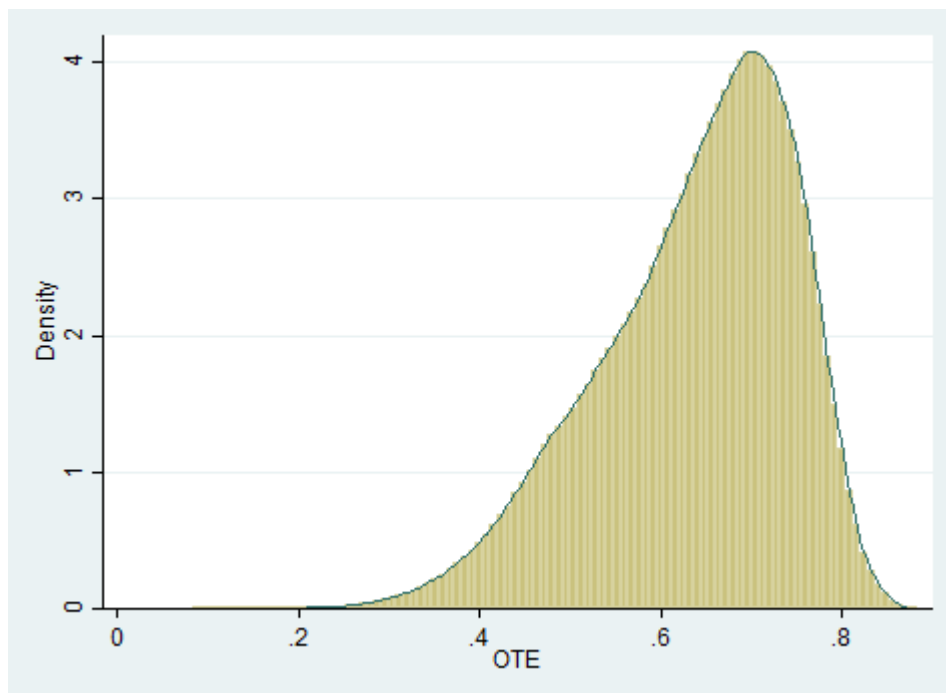


Figura 12: Histograma dos escores de eficiências técnicas do modelo 1 no período entre 1995/96 e 2017  
Fonte: Elaborado pelo autor

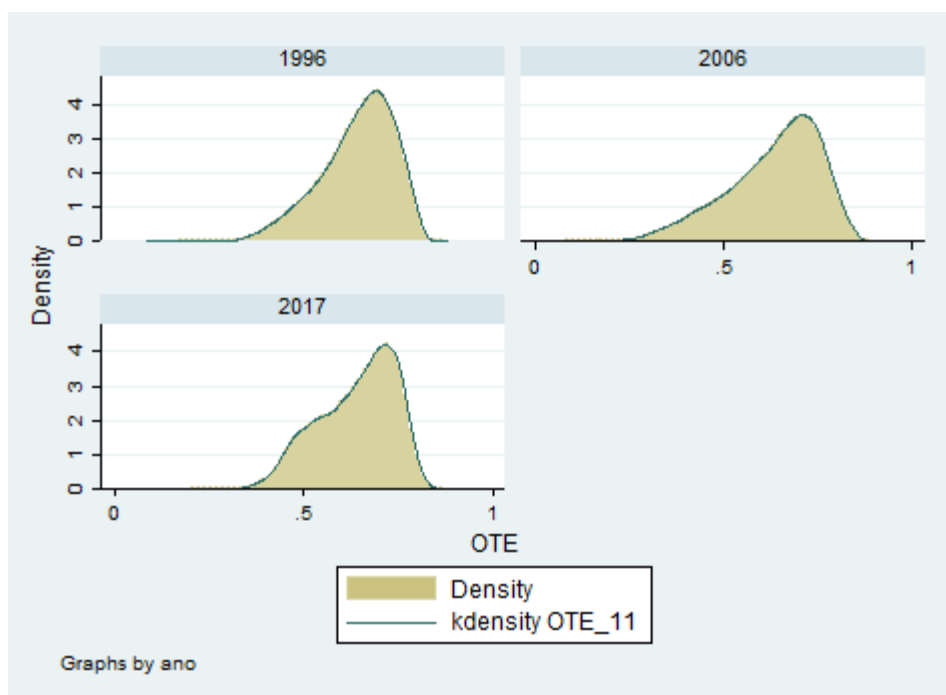


Figura 13: Histograma dos escores de eficiências técnicas do modelo 1 para os anos censitários em análise  
Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE B.

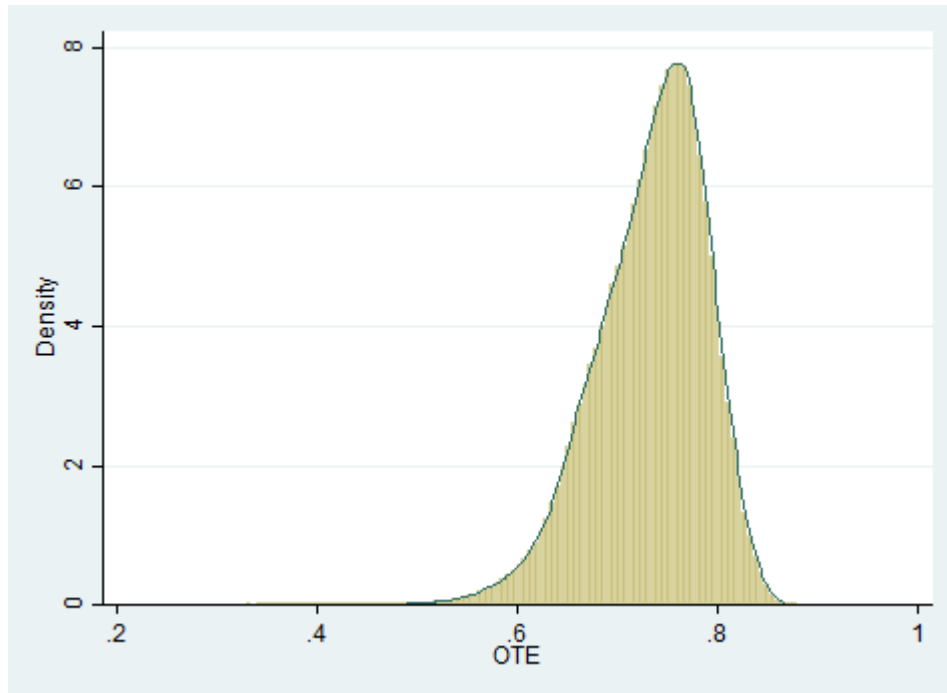


Figura 14: Histograma dos escores de eficiências técnicas do modelo 2 no período entre 2006 e 2017  
 Fonte: Elaborado pelo autor

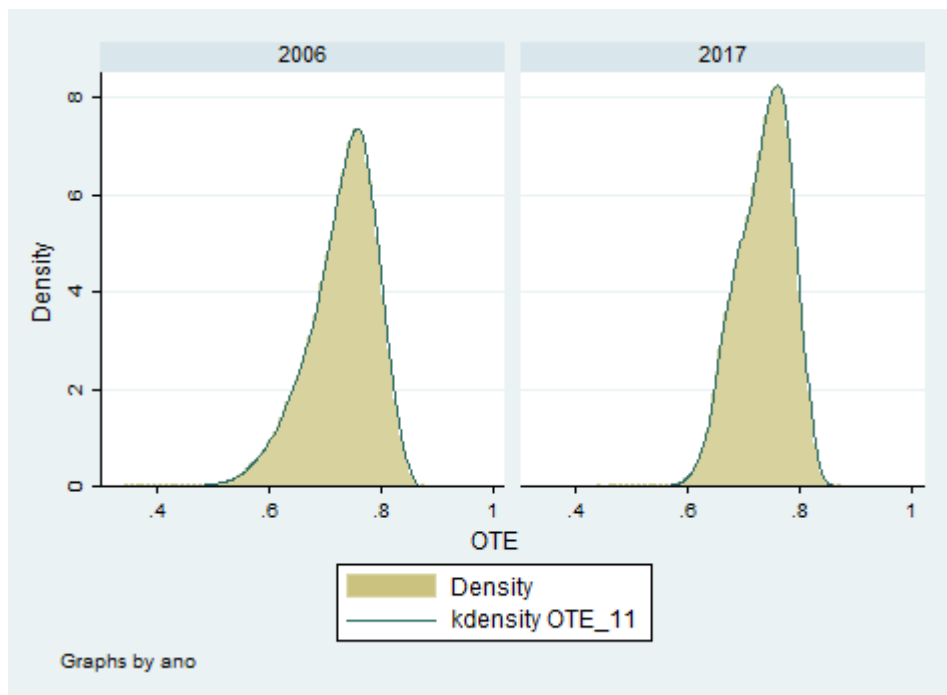


Figura 15: Histograma dos escores de eficiências técnicas do modelo 2 para os anos censitários em análise  
 Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXOS

ANEXO A.

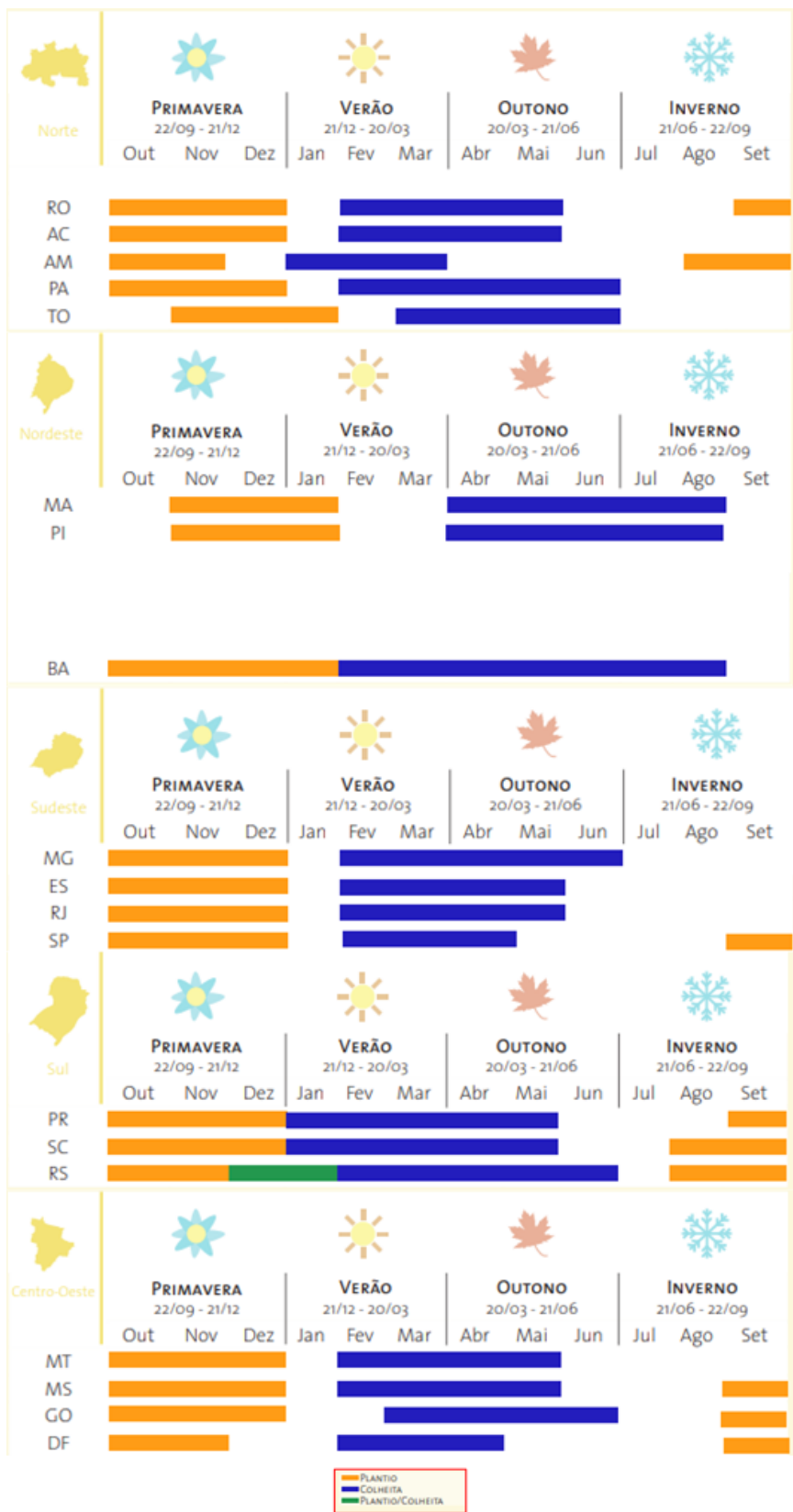


Figura 16: Calendário de plantio e colheita do milho 1ª Safra  
 Fonte: CONAB (2022).

ANEXO B.

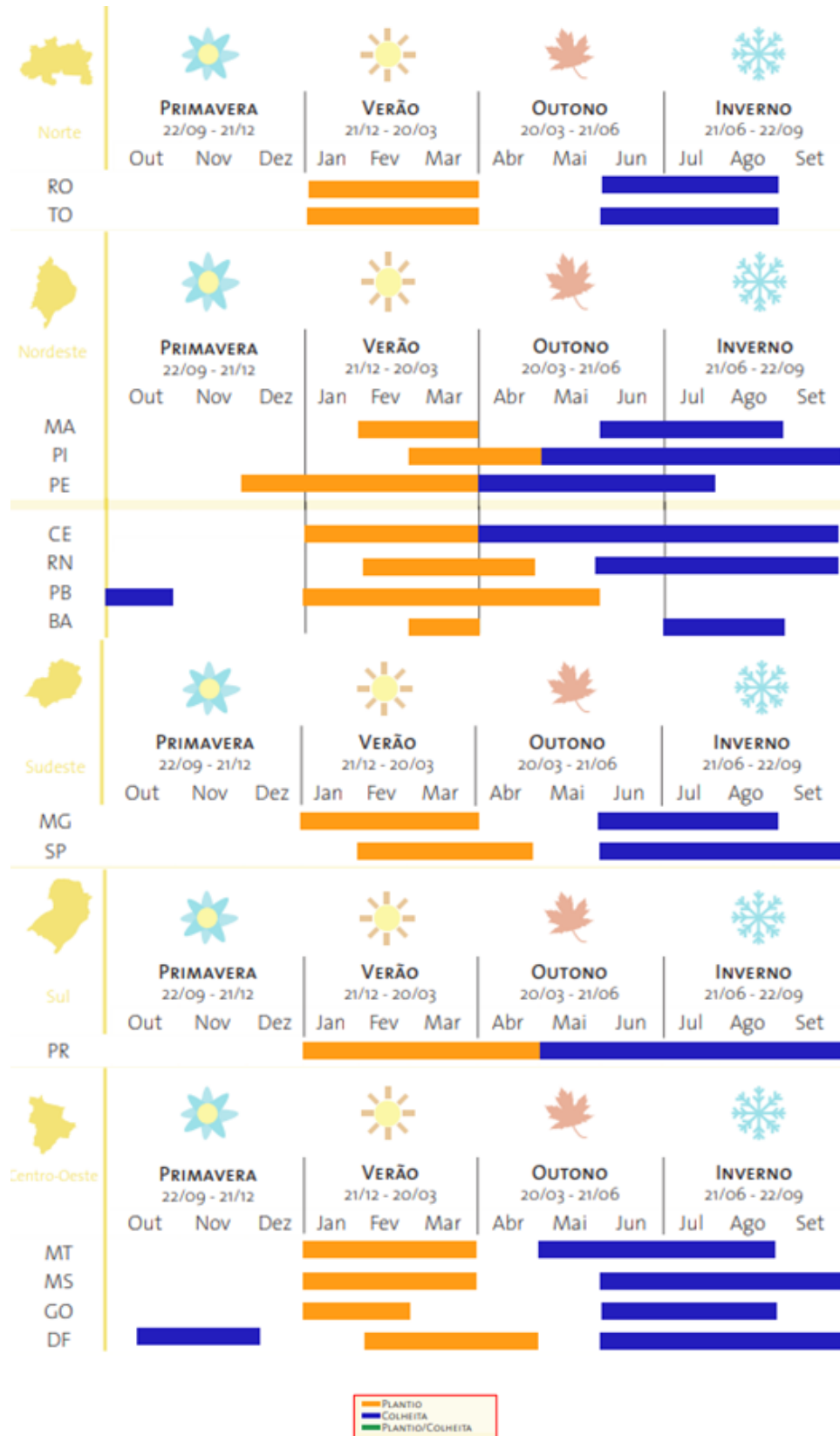


Figura 17: Calendário de plantio e colheita do milho 2ª Safra  
 Fonte: CONAB (2022).

## ANEXO C.

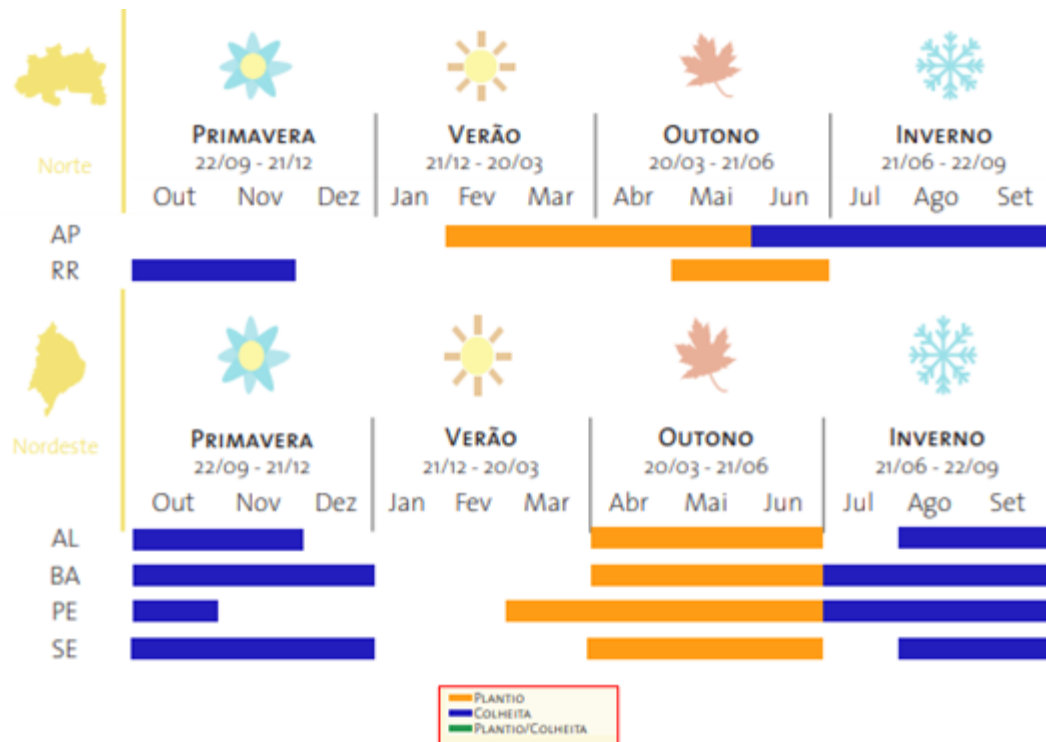


Figura 18: Calendário de plantio e colheita do milho 3ª Safra  
 Fonte: CONAB (2022).