

# Determinantes da produtividade total dos fatores da lavoura de milho no Brasil: uma análise de fronteira estocástica para o período de 1995 a 2017

*Determinants of corn total factor productivity in Brazil: a stochastic frontier analysis for the period from 1995 to 2017*

Felipe Miranda de Souza Almeida<sup>1</sup> , Humberto Francisco Silva Spolador<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba (SP), Brasil. E-mails: felipemiranda.almeida@gmail.com; hspolador@usp.br

**Como citar:** Almeida, F. M. S., & Spolador, H. F. S. (2024). Determinantes da produtividade total dos fatores da lavoura de milho no Brasil: uma análise de fronteira estocástica para o período de 1995 a 2017. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 62(4), e287305. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2023.287305>

**Resumo:** O milho é uma cultura amplamente distribuída em diferentes regiões brasileiras, e desempenha um papel relevante na alimentação humana e animal. Embora, nos últimos anos, tenham sido observados avanços produtivos, é essencial manter essa tendência para garantir a segurança alimentar, especialmente diante do crescimento populacional, da renda e do uso de biocombustíveis, que demandam matérias-primas provenientes de culturas alimentares. Nesse contexto, esse trabalho analisa a evolução da Produtividade Total dos Fatores (PTF) da lavoura de milho do Brasil no período de 1995 a 2017, decompondo o crescimento da PTF para identificar seus determinantes, a partir de um modelo de fronteira estocástica com os microdados dos três últimos censos agropecuários. Os resultados indicam que o crescimento médio da PTF foi de 0,76% a. a. no período analisado, sendo impulsionado principalmente pelo progresso técnico, que cresceu a uma taxa média de 0,826% a.a. Os determinantes que explicam as mudanças na produtividade devido a fatores observados e não observados relacionados ao ambiente de produção e à eficiência técnica também afetaram positivamente a produtividade, porém em menor magnitude. Por outro lado, os efeitos de escala e as mudanças nas condições climáticas tiveram impacto negativo sobre a produtividade da lavoura.

**Palavras-chave:** produtividade, produtividade total dos fatores, fronteira estocástica, milho.

**Abstract:** Corn is a crop that is widely distributed in the different regions of Brazil and plays an important role in human and animal nutrition. Although there have been productive advances in recent years, it is essential to maintain this trend to guarantee food security, especially in the face of population growth, income, and the use of biofuels, which demand raw materials from food crops. In this context, this paper analyzes the evolution of Total Factor Productivity (TFP) in Brazilian corn farming from 1995 to 2017, decomposing TFP growth to identify its determinants using a stochastic frontier model with microdata from the last three Agricultural Censuses. The results indicate that average TFP growth was 0.76% per annum in the period analyzed, driven mainly by technical progress, which grew at an average rate of 0.826% per annum. The determinants that explain changes in productivity due to observed and unobserved factors related to the production environment and changes in technical efficiency also positively affected productivity but to a lesser extent. On the other hand, scale effects and changes in climatic conditions had a negative impact on crop productivity.

**Keywords:** productivity, total factor productivity, stochastic frontier, corn.

## Introdução

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 seu processo de modernização, o que possibilitou incorporações de técnicas e tecnologias que alteraram as formas de produção agropecuária, sendo que estas, por sua vez, proporcionaram elevados



ganhos de produtividade, fato que tem se destacado nas últimas décadas (Alves & Bacha, 2018; Bacha, 2018). Embora os ganhos de produtividade do setor agrícola tenham aumentado a disponibilidade de alimentos, torna-se importante a manutenção dessa trajetória para garantir a segurança alimentar, especialmente com o aumento contínuo da população mundial, da renda e do uso de biocombustíveis, que requerem matérias-primas de culturas alimentares (Baldos & Hertel, 2014; Barrett, 2021).

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 atingir maiores níveis de eficiência nos sistemas agroalimentares<sup>1</sup>. Adicionalmente, compreender o avanço da produtividade é um dos objetivos fundamentais da pesquisa econômica, uma vez que seu crescimento oferece à sociedade a oportunidade de elevar o seu bem-estar (Fuglie & Schimmelpfennig, 2010), além de fornecer informações importantes para os formuladores de políticas públicas.

Segundo Garcia 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% a.a. na média, e a Produtividade Total dos Fatores (PTF) cresceu de 2,03% a.a. no período mencionado. Garcia Gasques et al. (2022) ainda estimaram que, entre 1975 e 2020, a PTF da agropecuária brasileira apresentou uma taxa de crescimento média de 3,33% a. a., sendo que as taxas anuais de crescimento do produto e dos insumos ficaram em torno de 3,79% e 0,45%, respectivamente.

Entre as culturas agrícolas produzidas no Brasil, o milho obtém destaque devido à sua distribuição pelas regiões brasileiras (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022) e significativa importância na alimentação humana e animal (Alves & Bacha, 2018); ressalta-se 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 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022), o valor da produção de milho representou 15,7% do valor de produção da agricultura no ano de 2021, sendo superado apenas pela soja, responsável por 46%; enfatiza-se que, de 2001 a 2020, a cultura do milho gerou um valor adicionado de R\$ 715 bilhões, 9% do valor gerado pela agropecuária (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, 2021).

Segundo Alves et al. (2008), Garcia Gasques et al. (2010, 2020), Bacha (2018) e Alves & Bacha (2018), os ganhos produtivos na produção de grãos, especialmente do milho, estão relacionados com a pesquisa agropecuária, liderada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), e ainda com políticas agrícolas de extensão rural, incorporação de áreas com maiores produtividades, uso eficiente dos fatores de produção, maiores investimentos e o desenvolvimento de tecnologias mais modernas, adaptadas às condições edafoclimáticas brasileiras.

Vários estudos têm sido conduzidos para avaliar a produtividade agrícola no Brasil (Alves et al., 2008; Bragagnolo et al., 2010, 2021; Garcia Gasques et al., 2022; Machado et al., 2020), porém, ainda são escassas, na literatura, pesquisas que analisem de forma mais detalhada os determinantes da produtividade da lavoura de milho em nível estadual, a exemplo do que foi feito por Soares & Spolador (2019) em relação à produção de milho no estado de São Paulo.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo investigar a evolução da Produtividade Total dos Fatores (PTF) na produção de milho no período de 1995 a 2017, e decompor o seu crescimento para medir a contribuição do progresso técnico, os ganhos de escala e a eficiência técnica, a fim de gerar resultados que, potencialmente, possam subsidiar políticas públicas direcionadas para o desenvolvimento do setor agrícola brasileiro. Para isso, além desta introdução,

---

<sup>1</sup> Tem sido observada uma redução do crescimento da produtividade, conforme destacado por Gordon & Sayed (2022) que mostraram a redução das taxas de crescimento da produtividade do trabalho e da PTF nos Estados Unidos.

este artigo apresenta quatro seções subsequentes, quais sejam: a fundamentação teórica em que se define o modelo empírico, a descrição da metodologia empregada, bem como a base de dados utilizada, a apresentação dos resultados e discussão e, finalmente, a conclusão.

### Fundamentação Teórica

Utiliza-se, nesse estudo, o arcabouço da Análise de Fronteira Estocástica (SFA), proposta simultaneamente por Aigner et al. (1977) e Meeusen & van den Broeck (1977). A SFA consiste em um método estatístico utilizado para estimação e análise da eficiência produtiva na presença de fatores aleatórios e ineficiências, de modo a permitir a avaliação do desempenho de uma unidade tomadora de decisão (DMU) em relação ao seu potencial máximo, dada a tecnologia existente, sugerindo que nem todas as unidades são sempre bem-sucedidas em solucionar os problemas de otimização (por exemplo, maximizar a produção, levando-se em consideração 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 direcionam a um desempenho abaixo do ótimo (Kumbhakar & Lovell, 2000).

Essa abordagem requer a especificação de uma forma funcional da fronteira de produção, optando-se, no presente estudo, por especificar a forma log-linear da função *Cobb-Douglas*. Essa tecnologia satisfaz globalmente as condições de monotonicidade e a quase-concavidade 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 se obter, diretamente, as elasticidades de produção a partir dos parâmetros da função; a soma dos coeficientes estimados também representa os rendimentos à escala, e possui um número menor de parâmetros a serem estimados em comparação com outras formas funcionais (Kumbhakar et al., 2015).

O modelo é definido como:

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

onde  $q_{it}$  é o escalar do produto da firma  $i$  no tempo  $t$ ;  $x_{it}$  é o vetor dos fatores de produção (ou insumos convencionais) utilizados pela firma  $i$  no tempo  $t$ ;  $\beta$  é o vetor de parâmetros desconhecidos a serem estimados;  $v_{it}$  é o primeiro componente do erro que busca capturar os efeitos de ruídos estatísticos, com  $v_{it} \sim iidN(0, \sigma_v^2)$ ; e  $u_{it}$  ( $u_{it} \geq 0$ ) é o segundo componente do erro que busca capturar os efeitos da ineficiência técnica, com  $u_i \sim iidN^+(0, \sigma_u^2)$  (Coelli et al., 2005; Kumbhakar & Lovell, 2000).

A eficiência técnica é definida como:

$$TE_{it} = \frac{q_{it}}{\exp(x_{it}; \beta) \exp\{v_{it}\}} = \exp(-u_{it}) \quad (2)$$

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), e da existência de ineficiência técnica por meio dos testes propostos por D'agostino et al. (1990) e Coelli (1995).

Na sequência da estimativa do modelo de fronteira estocástica, pode-se conduzir uma análise de produtividade, construindo-se um índice de produtividade total dos fatores. A partir de O'Donnell (2012, 2018), a PTF da firma  $i$  no período  $t$  é definida como:

$$PTF_{it} = \frac{QI(q_{it})}{XI(x_{it})} \tag{3}$$

onde  $QI(q_{it})$  e  $XI(x_{it})$  são índices do produto e dos insumos. O índice referente à PTF utilizado nesta pesquisa é 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 ponderações não negativas que somam 1. Para o caso de um único produto, como no presente estudo, a Equação 4 pode ser escrita como:

$$PTF_{it} = \frac{q_{it}}{XI(x_{it})} \tag{4}$$

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:

$$IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) = \frac{PTF(q_{it}, x_{it})}{PTF(q_{ks}, x_{ks})} = \frac{q_{it}}{q_{ks}} \frac{XI(x_{ks})}{XI(x_{it})} = \frac{q_{it}}{q_{ks}} \prod_{m=1}^M \left( \frac{x_{mks}}{x_{mit}} \right)^{b_m} \tag{5}$$

Segundo Njuki et al. (2019), quaisquer ponderações não negativas invariantes que somem 1 podem ser utilizadas 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. 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 Equação 1. Assim, a partir da Equação 5 obtém-se:

$$IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) = \underbrace{\left[ \prod_{m=1}^M \left( \frac{x_{mit}}{x_{mks}} \right)^{-b_m} \frac{\exp(f^t(x_{it}, q_{it}))}{\exp(f^s(x_{ks}, q_{ks}))} \right]}_{OETSMEI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(-u_{it})}{\exp(-u_{ks})} \right]}_{OTEI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(v_{it})}{\exp(v_{ks})} \right]}_{SNI} \tag{6}$$

onde  $OETSMEI$  é um índice de ambiente, tecnologia e de eficiência de escala orientado para o produto, que captura flutuações na PTF devido a variações em fatores do ambiente produtivo, na tecnologia e nas economias de escala e de substituição;  $OTEI$  é um índice de eficiência orientado a produto, que mede diferenças na habilidade das DMUs em maximizarem a produção dado o 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.

## Metodologia

Para a realização da análise foram utilizadas informações dos estabelecimentos produtores de milho, dos microdados dos censos agropecuários de 1995/96, 2006 e 2017, reunindo informações relativas aos estabelecimentos agropecuários das produções e utilizações de

fatores de produção pela agricultura, pecuária e agroindústria, bem como demais características dos produtores e dos estabelecimentos<sup>2</sup>. As variáveis consideradas foram: valor da produção de milho, quantidade produzida, área colhida, população ocupada, despesa agrícola, despesa com contratação de serviços de empreitada, número de tratores, número de implementos agrícolas (colheitadeira, plantadeira e adubadeira)<sup>3</sup>, capacidade de armazenagem, utilização de assistência técnica, participação de cooperativas e/ou entidades de classe e associações, 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 em equivalente-homem (EHT), estratégia adotada por Felema & 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, faz-se necessário calcular o número de equivalente-homem com serviços de empreitada, conforme:

$$SEEH = \left( \frac{SE}{VD} \right) / 300 \quad (7)$$

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, utilizaram-se os dados referentes aos Preços Agropecuários - Remuneração do Trabalho Agrícola da Fundação Getulio Vargas (FGV) para todos os 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 aplicaram-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. No presente estudo, foram utilizadas as variáveis temperatura (grau 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 et al. (2006) e Xavier et al. (2016).

A base de dados contém informações, em nível municipal, de temperatura média mensal e de precipitação mensal acumulada para o período de janeiro de 1948 a dezembro de 2016, entretanto, foram utilizadas apenas informações a partir de 1980. Para a compatibilização com as informações dos censos agropecuários, utilizando-se valores mensais, foram calculadas 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 sugerido por Lachaud & Bravo-Ureta (2021) e Lachaud et al. (2022)

<sup>2</sup> Nessa pesquisa, a análise da PTF não foi segmentada em agricultura familiar ou não familiar.

<sup>3</sup> Em Hall & Jones (1999) e Kehoe & Ruhl (2010) há uma discussão mais detalhada sobre a construção de séries de estoque de capital.

De posse dessas informações, foram realizados alguns tratamentos com o intuito de tornar as informações propícias para realizar a análise e as estimações, de modo que foram excluídos produtores sem registro de área colhida, sem quantidade produzida e/ou sem valor da produção de milho; produtores sem área total e/ou de lavoura temporária; produtores sem valor da produção total e/ou de lavoura temporária; e produtores sem despesa agrícola, com menos de uma unidade de EHT e sem informações das variáveis climáticas utilizadas. Em seguida, construiu-se uma variável percentil da produtividade em nível de Brasil, e outra em nível de Unidade da Federação (UF), excluindo produtores fora dos percentis 3 a 99 em nível nacional e/ou fora dos percentis 6 a 95 em nível de cada UF. A Tabela 1 apresenta uma descrição das variáveis incluídas no estudo.

**Tabela 1** - Descrição das variáveis utilizadas no estudo

Variável	Unidade de medida*	Descrição
Valor da produção	R\$ de 2017	Valor da produção de milho
Quant. 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
Temperatura	°C	Temperatura média anual
Precipitação	Milímetro	Precipitação anual 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:** Elaboração própria.

**Nota:** \*os valores monetários foram deflacionados pelo Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna (IGP-DI) (12/2017 = 100) (FGV, 2022).

Para a estimativa do modelo empírico, optou-se por utilizar a função de produção *Cobb-Douglas*, e, a partir da Equação 1, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 f^t(x_{it}, q_{it}) = & \beta_0 + \lambda t + \beta_1 \ln x_{1it} + \beta_2 \ln x_{2it} + \\
 & \beta_3 \ln x_{3it} + \beta_4 \ln x_{4it}^* + \beta_5 D_{4i} + \beta_6 Z_{1i} + \beta_7 Z_{2i} + \\
 & \beta_8 Z_{3i} + \beta_9 Z_{4i} + \beta_{10} SE_i + \beta_{11} S_i + \beta_{12} CO_i + \\
 & \beta_{13} GA_{1i} + \beta_{14} GA_{2i} + \beta_{15} \ln Temp_{it} + \beta_{16} ATemp_{it} + \\
 & \beta_{17} \ln Prec_{it} + \beta_{18} APrec_{it} + v_{it} - u_{it}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

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 o 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 *proxxy* para capital;  $Z_{1i}$  é a variável *dummy* que identifica se o estabelecimento possui alguma capacidade de 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 a 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);  $GA_{2i}$  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 de 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 2 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na estimativa do modelo.

**Tabela 2** - Estatística descritiva das variáveis utilizadas no modelo de fronteira estocástica

Variável	Média	Desvio padrão	p25	p50	p75
Quantidade	26.021,54	509.967,34	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	942.717,38	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: Elaboração própria.

Considerando a Equação 8, pode-se redefinir a Equação 6 como:

$$IPTF(x_{ks}, q_{ks}, x_{it}, q_{it}) = \underbrace{\left[ \frac{\exp(\lambda t)}{\exp(\lambda s)} \right]}_{OTI} \underbrace{\left[ \frac{Temp_{it}^{\beta_{15}} Prec_{it}^{\beta_{17}} \exp(\beta_{16} \cdot ATemp_{it}) \exp(\beta_{18} \cdot APrec_{it})}{Temp_{ks}^{\beta_{15}} Prec_{ks}^{\beta_{17}} \exp(\beta_{16} \cdot ATemp_{ks}) \exp(\beta_{18} \cdot APrec_{ks})} \right]}_{OCI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(\beta_4 D_{4i}) \exp(\beta_6 Z_{1it}) \exp(\beta_7 Z_{2it}) \exp(\beta_8 Z_{3it})}{\exp(\beta_4 D_{4k}) \exp(\beta_6 Z_{1ks}) \exp(\beta_7 Z_{2ks}) \exp(\beta_8 Z_{3ks})} \right]}_{OEI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(\beta_9 Z_{4it}) \exp(\beta_{11} S_i) \exp(\beta_{12} CO_i) \exp(\beta_{13} GA_i) \exp(\beta_{14} GA_{2i})}{\exp(\beta_9 Z_{4ks}) \exp(\beta_{11} S_k) \exp(\beta_{12} CO_k) \exp(\beta_{13} GA_k) \exp(\beta_{14} GA_{2k})} \right]}_{OSEI} \underbrace{\left[ \frac{1}{(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4)} \right]}_{OTEI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(-u_{it})}{\exp(-u_{ks})} \right]}_{SNI} \underbrace{\left[ \frac{\exp(v_{it})}{\exp(v_{ks})} \right]}_{SNI} \tag{9}$$

A Equação 9 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 que reflete o impacto de variáveis climáticas (*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.

### Resultados e Discussão

Inicialmente, buscou-se encontrar suporte para a especificação de fronteira estocástica, com o propósito de se verificar a existência do termo de ineficiência ( $u_{it}$ ). 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 et al. (1990) e Coelli (1995), rejeitando a hipótese nula de não haver assimetria nos resíduos da estimação por MQO ao nível de 1% de significância.

Verificada a existência do termo de ineficiência, estimou-se o modelo de 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>4</sup>. Na Tabela 3, estão os coeficientes estimados para o modelo de fronteira estocástica, em que todos os parâmetros se mostraram estatisticamente significativos ao nível de 1% de significância, e são satisfeitas todas as condições de regularidade relativas às elasticidades.

<sup>4</sup> O valor crítico da estatística ao nível de 1% de significância é 5,412.



**Tabela 3** - Resultados do modelo empírico

	Coefficientes	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>Usigmas</i>		
Constante	-0,873***	0,00649
<i>Vsigmas</i>		
Constante	-0,885***	0,00236
Total de observações	4.815.637	
Log likelihood	-5.449.512,8	
Wald chi2	27.222.137,9	
Prob > chi2	0,0000	

**Fonte:** Elaboração própria.

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

A soma dos coeficientes das variáveis terra, capital, trabalho e despesas agrícolas foi igual a 1,041. 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 & Spolador (2019) encontram resultado semelhante quando da análise relativa a produtores de milho no Brasil e no estado de São Paulo.

Observa-se que o insumo terra possui a maior elasticidade, indicando que apresenta maior potencial para aumentar a produção de milho no Brasil. Soares & Spolador (2019) também analisam a importância do fator terra, considerada a variável de maior impacto no aumento da produção, embora se deva destacar que a expansão da produção, via maior utilização de terras agrícolas, muitas vezes, é inviabilizada pelas restrições legais sobre o uso do solo.

A despesa agrícola apresentou uma elasticidade intermediária, enquanto trabalho e capital apresentaram elasticidade menor. Embora tenham analisado a agropecuária como um todo, Lázari & Magalhães (2019) e Ferreira & Vieira Filho (2020) evidenciam a importância das despesas com insumos para o aumento da produção agropecuária, e sua maior elasticidade em comparação com os insumos capital e trabalho. O coeficiente de tendência temporal (*t*) da função de produção é positivo e estatisticamente significativo, por indicar a presença de progresso técnico médio de 0,43% ao ano entre 1995/96 e 2017.

No que diz respeito às variáveis climáticas, tanto a anomalia de temperatura quanto a temperatura média exercem uma influência negativa na produção; isso equivale a dizer 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 o fato de se ter o milho como principal atividade econômica impactam positivamente na produção.

Ferreira & Vieira Filho (2020) demonstram que a capacidade de armazenagem afeta diretamente a tomada de decisão do produtor e a comercialização do grão, possibilita a redução das perdas do produto, e conserva suas qualidades físicas e químicas. Os autores também estabelecem que a maior capacidade de armazenagem está associada à maior eficiência no processo produtivo, com redução de perdas e menores custos. Souza et al. (2020) também argumentam que a associação em cooperativas e o acesso à assistência técnica se configuram em um dos principais fatores nas reduções de imperfeições de mercado e na promoção de renda.

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 de 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 os produtores de milho alcançam, em média, 64,8% do nível máximo possível, ou que aproximadamente 35% do produto potencial é perdido devido à ineficiência técnica; ao serem analisadas as médias anuais, não se observam mudanças significativas ao longo do período. Na Tabela 4, estão as médias das eficiências técnicas no período compreendido entre 1995/96 e 2017, e médias anuais para o Brasil e para as UFs.

Com exceção do 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 apresentaram redução do 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, demonstraram redução do nível de eficiência técnica médio.

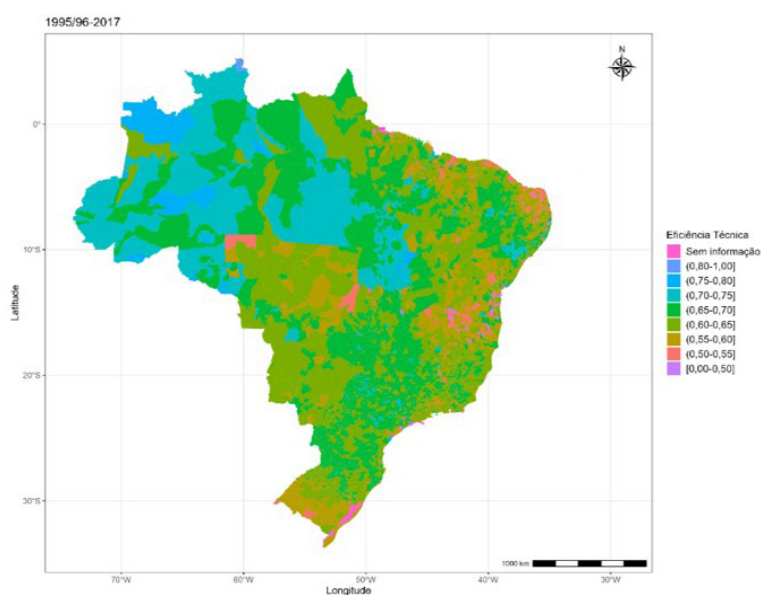
Na Figura 1, observa-se a distribuição espacial da eficiência técnica média, em nível municipal, para o período de 1995-2017. De modo geral, é possível verificar certa heterogeneidade quanto à distribuição das eficiências técnicas médias, não sendo possível identificar um padrão de regiões tecnicamente eficientes; um fato que chama a atenção são os altos valores médios encontrados para alguns municípios da região Norte.

O crescimento da produtividade da lavoura é medido e decomposto por meio de um índice multiplicativo PTF. Na Tabela 5, apresentam-se as taxas de crescimento da PTF e de seus componentes (inicialmente obtidos conforme a Equação 9), no período entre 1995/96 e 2017, tendo sido observado 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 et al., 2021; Felema & Spolador, 2023; Garcia 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 aquém das encontradas para a agropecuária brasileira como um todo.

**Tabela 4 - Médias das eficiências técnicas e médias anuais para o Brasil, e para as Unidades da Federação (1995/96, 2006 e 2017)**

	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

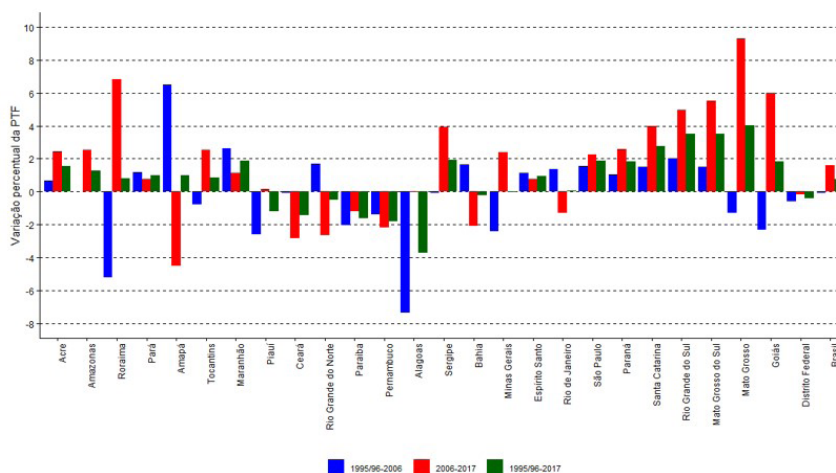
Fonte: Elaboração própria.



**Figura 1 - Distribuição espacial das eficiências técnicas médias por município no período entre 1995/96 e 2017.**

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 2, 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 2 -** Variação percentual da PTF, por estado, nos períodos 1995/96-2006, 2006-2017 e 1995/96-2017.

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 5 -** Variação percentual da PTF e dos seus componentes por UF, 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: Elaboração própria.

Nota: \*média aritmética

Durante o período, o principal determinante do crescimento da PTF foi o progresso técnico (*OTI*), que cresceu a uma taxa média de 0,826% ao ano; esse resultado está atrelado ao desenvolvimento e uso de novas tecnologias na produção do grão. Para Alves et al. (2018), os ganhos produtivos na lavoura resultam da adoção de novas tecnologias adaptadas às condições edafoclimáticas brasileiras. Bahia Filho et al. (2008) argumentam que o crescimento da produtividade do milho está relacionado com o avanço do melhoramento de plantas, e com a melhoria nas práticas e processos produtivos. Contini et al. (2010) destacam o papel da adoção de tecnologias e insumos modernos, como fertilizantes e novas cultivares, a incorporação de terras mecanizáveis, a expansão do uso de máquinas agrícolas automotrizes, bem como pelas inovações introduzidas no processo de produção, como o sistema de plantio direto, o manejo integrado de pragas, entre outras, muito significativas 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 às características do 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 a variação da eficiência técnica foi de 0,009% ao ano. Por outro lado, os índices de escala (*OSEI*) e de mudanças nas condições climáticas (*OCI*) apresentaram redução 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% em nível nacional.

Nota-se, na Tabela 5, 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 se tenha observado progresso técnico nessas UFs, os resultados foram influenciados pelos índices referentes à eficiência técnica (*OITEI*) 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 *OITEI*, *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 Mõro & Fritsche-Neto (2015), um significativo 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, como aqueles observados no semiárido<sup>5</sup>.

De modo geral, as regiões Centro-Oeste e Sul têm garantido o crescimento da produção de milho no Brasil – regiões onde as UFs apresentaram as taxas de crescimento da PTF mais elevadas, embora a região Sul tenha perdido representatividade ao longo dos últimos anos. O destaque é dado para o Mato Grosso, que apresentou uma taxa média de crescimento da produtividade de 4,060%. 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.

<sup>5</sup> Adicionalmente, Oliveira et al. (2009) simulam alterações na produtividade das lavouras de feijão e milho para os anos de 2020, 2050 e 2080, tendo como base o ano de 2000 e levando em consideração potenciais condições climáticas futuras no estado de Minas Gerais. Destacam-se, entre os resultados dos autores, que, considerando-se apenas as condições climáticas futuras, houve redução da produtividade em todas as mesorregiões do estado, ao passo que a inclusão do progresso tecnológico nas simulações mostrou um aumento da produtividade potencial de ambas as lavouras em todas as mesorregiões analisadas.

A Tabela 6 apresenta as variações da PTF e de seus componentes no período entre 1995/96 e 2006, em que se observa uma taxa média de -0,064% ao ano, variando entre -7,361% em Alagoas, e 6,519% no Amapá. Nesse período específico, até houve crescimento positivo do progresso técnico e do ambiente de produção (*OEI*), no entanto, os índices de eficiência técnica (*OTEI*) e das condições climáticas (*OCI*) tiveram impactos negativos predominantes na determinação dos resultados.

**Tabela 6** - Variação percentual da PTF e dos seus componentes por UF, 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:** Elaboração própria.

**Nota:** \*média aritmética

Também se observa que, entre as UFs, 14 delas apresentaram variação positiva da PTF. Novamente, o componente tecnologia foi o principal fator que influenciou no crescimento da PTF, tendo também *OEI* e *OTEI* com impacto significativo na sustentação do crescimento. 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.

Na Tabela 7 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 em 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 variações e magnitudes semelhantes entre as UFs. Já para as UFs que apresentaram variações negativas da PTF, os componentes que mais contribuíram para o resultado foram *OTEI* e *OEI*.

**Tabela 7** - 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: Elaboração própria.

Nota: \*média aritmética

## Conclusões

O presente artigo analisou a evolução da PTF da produção brasileira de milho entre os períodos de 1995/96 a 2017, com a utilização de microdados censitários e de variáveis do banco de dados disponibilizados 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%; sendo que o principal determinante para o 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 do ambiente de produção e de eficiência técnica também impactaram positivamente na 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.

Assim sendo, a dinâmica do crescimento da produtividade não ocorreu de forma uniforme em todas as UFs do Brasil, tendo em vista que, em algumas, 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, em razão da heterogeneidade do processo produtivo adotado pelos estabelecimentos, bem como das condições edafoclimáticas específicas.

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 pela qual a análise das mudanças nesses 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 inferir que a taxa de crescimento da PTF tem papel significativo no desenvolvimento da lavoura do milho, especialmente quando se trata de incorporação e adoção de tecnologias.

É importante ressaltar, no entanto, algumas limitações encontradas durante a realização desse 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, uma vez que podem influenciar significativamente nos 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, dada 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, 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.

Outra informação importante diz respeito à finalidade da produção, sendo que apenas o Censo Agropecuário de 2017 identificou a finalidade para consumo próprio ou para comercialização da produção, tendo sido desconsiderada nesta análise. Houve também a dificuldade em capturar a qualidade dos insumos, bem como a utilização de insumos específicos importantes para a lavoura do milho, tais como sementes, fertilizantes e defensivos; com relação a esses, 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 dessas variáveis, em razão de que isso possibilitará capturar e controlar melhor a heterogeneidade produtiva da produção de milho no Brasil e, por consequência, o aprimoramento dos resultados encontrados. Além disso, considerando-se que o crescimento da produtividade não ocorreu de forma homogênea entre as UFs, seria interessante desenvolver estudos que viessem a analisar a hipótese de convergência da produtividade.

Finalmente, seria relevante investigar o impacto de novas tecnologias e de práticas agrícolas sustentáveis na produtividade da lavoura do milho; em razão de que 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. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21-37. [http://doi.org/10.1016/0304-4076\(77\)90052-5](http://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5)
- Alves, E. R. de A., Contini, E., & Garcia Gasques, J. (2008). Evolução da produção e produtividade da agricultura brasileira. In A. G. Albuquerque & A. C. S. Silva (Eds.), *Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas* (pp. 67-100). Embrapa Informação Tecnológica.
- Alves, L. R. A., & Bacha, C. J. C. (2018). *Panorama da agricultura brasileira: estrutura de mercado, comercialização, formação de preços, custos de produção e sistemas produtivos*. São Paulo: Alínea.
- Alves, L. R. A., Barros, G. S. C., Sanches, A. L. R., Ribeiro, R. G., & Osaki, M. (2018). Estrutura de mercado e formação de preços na cadeia produtiva de milho. In L. R. A. Alves & C. J. C. Bacha (Eds.), *Panorama da agricultura brasileira* (pp. 133-176). São Paulo: Alínea.
- Artuzo, F. D., Foguesatto, C. R., Machado, J. A. D., Oliveira, L., & Souza, A. R. L. (2019). O potencial produtivo brasileiro: uma análise histórica da produção de milho. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 12(2), 515. <http://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n2p515-540>
- Bacha, C. J. C. (2018). *Economia e Política Agrícola no Brasil*. São Paulo: Alínea.
- Bahia Filho, A. F. C., Garcia, J. C., Parentoni, S. N., Santana, D. P., Cruz, J. C. C., & Schaffert, R. E. (2008). Impulsionando a produção e a produtividade de milho e sorgo, no Brasil. In A. G. Albuquerque & A. C. S. Silva (Eds.), *Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas* (pp. 125-162). Embrapa Informação Tecnológica.
- Baldos, U. L. C., & Hertel, T. W. (2014). Global food security in 2050: the role of agricultural productivity and climate change. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 58(4), 554-570. <http://doi.org/10.1111/1467-8489.12048>
- Barrett, C. B. (2021). Overcoming global food security challenges through science and solidarity. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(2), 422-447. <http://doi.org/10.1111/ajae.12160>
- Battese, G. E. (1997). A note on the estimation of Cobb-Douglas production functions when some explanatory variables have zero values. *Journal of Agricultural Economics*, 48(1-3), 250-252. <http://doi.org/10.1111/j.1477-9552.1997.tb01149.x>
- Bergamaschi, H., & Matzenauer, R. (2014). *O milho e o clima*. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar.
- Bragagnolo, C., Spolador, H. F. S., & Barros, G. S. de C. (2010). Regional Brazilian agriculture TFP analysis: a stochastic frontier analysis approach. *Revista Economia*, 11(4), 217-242.
- Bragagnolo, C., Spolador, H. F. S., & Barros, G. S. C. (2021). PTF agrícola: atualização segundo o Censo de 2017. *Revista de Política Agrícola*, 30(3), 107-122. Recuperado em 4 de junho de 2024, de <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1617/pdf>
- Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA. (2021). *PIB cadeia do milho*. Recuperado em 4 de junho de 2024, de [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)
- Coelli, T. J. (1995). Estimators and hypothesis tests for a stochastic frontier function: a Monte Carlo analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 6(3), 247-268. <http://doi.org/10.1007/BF01076978>
- Coelli, T. J., Rao, D. S. P., O'Donnell, C. J., & Battese, G. E. (2005). *An introduction to efficiency and productivity analysis* (2nd ed.). Springer. Recuperado em 4 de junho de 2024, de <https://www.springer.com/gp/book/9780387242651>

- Contini, E., Garcia Gasques, J., Alves, E., & Bastos, E. T. (2010). Dinamismo da agricultura brasileira. *Revista de Política Agrícola*, 19, 42-64. Recuperado em 4 de junho de 2024, de <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/955130/1/Dinamismodaagriculturabrasileira.pdf>
- D'agostino, R. B., Belanger, A., & D'agostino Junior, R. B. (1990). A Suggestion for Using Powerful and Informative Tests of Normality. *The American Statistician*, 44(4), 316-321. <http://doi.org/10.1080/00031305.1990.10475751>
- Felema, J., & Spolador, H. F. S. (2022). Características regionais da produtividade e da mecanização da agropecuária brasileira. *Revista de Política Agrícola*, 31(3), 37-51.
- Felema, J., & Spolador, H. F. S. (2023). Decomposição espacial do crescimento da Produtividade Total dos Fatores (PTF) da agropecuária brasileira. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 61(3), e260708. <http://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.260708>.
- Ferreira, M. D. P., & Vieira Filho, J. E. R. (2020). Eficiência técnica na agropecuária: capacidade de armazenagem e densidade das rodovias. In J. E. R. Vieira Filho & J. Garcia Gasques (Eds.), *Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário* (pp. 161-172). Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). <http://doi.org/10.38116/978-65-5635-011-0/cap11>.
- Fuglie, K. O. (2018). Is agricultural productivity slowing? *Global Food Security*, 17, 73-83. <http://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.05.001>
- Fuglie, K. O., & Schimmelpfennig, D. (2010). Introduction to the special issue on agricultural productivity growth: a closer look at large, developing countries. *Journal of Productivity Analysis*, 33(3), 169-172. <http://doi.org/10.1007/s1123-010-0168-0>
- Fundação Getúlio Vargas – FGV. (2022, março 10). Índice geral de preços - disponibilidade interna - IGP-DI. Recuperado em 4 de junho de 2024, de <https://portalibre.fgv.br/>
- Garcia Gasques, J., Bacchi, M. R. P., Bastos, E. T., & Valdes, C. (2020). Crescimento e produtividade da agricultura brasileira: uma análise do Censo Agropecuário. In J. E. R. Vieira Filho & J. Garcia Gasques (Eds.), *Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário* (pp. 107-119). Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). <http://doi.org/10.38116/978-65-5635-011-0/cap7>.
- Garcia Gasques, J., Teles Bastos, E., Bacchi, M. R. P., & Valdes, C. (2010). Produtividade Total dos Fatores e Transformações da Agricultura Brasileira: análise dos dados dos Censos Agropecuários. In J. Garcia Gasques, J. E. R. Vieira Filho & Z. Navarro (Eds.), *A agricultura Brasileira: desempenho, desafios e perspectivas* (pp. 19-44). Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).
- Garcia Gasques, J., Bastos, E. T., Bacchi, M. R. P., & Vieira Filho, J. E. R. (2022). *Produtividade total dos fatores na agricultura: Brasil e países selecionados* (Texto Para Discussão, No. 2764, pp. 1-20). Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).
- Gordon, R., & Sayed, H. (2022) *A new interpretation of productivity growth dynamics in the pre-pandemic and pandemic era U.S. economy, 1950-2022* (NBER Working Paper Series, No. 30267). Recuperado em 4 de junho de 2024, de <http://www.nber.org/papers/w30267>
- Hall, R. E., & Jones, C. I. (1999). Why do some countries produce so much more output per worker than others? *The Quarterly Journal of Economics*, 114(1), 83-116. <http://doi.org/10.1162/003355399555954>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2022). *Pesquisa Agrícola Municipal - PAM 2021*. Recuperado em 4 de junho de 2024, de [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)

- Kehoe, T. J., & Ruhl, K. J. (2010). Why have economic reforms in Mexico not generated growth? *Journal of Economic Literature*, 48(4), 1005-1027. <http://doi.org/10.1257/jel.48.4.1005>
- Kumbhakar, S. C., & Lovell, C. A. K. (2000). *Stochastic frontier analysis*. Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/CBO9781139174411>.
- Kumbhakar, S. C., Wang, H.-J., & Horncastle, A. P. (2015). *A practitioner's guide to stochastic frontier analysis using Stata*. Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/CBO9781139342070>.
- Lachaud, M. A., & Bravo-Ureta, B. E. (2021). Agricultural productivity growth in Latin America and the Caribbean: an analysis of climatic effects, catch-up and convergence. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 65(1), 143-170. <http://doi.org/10.1111/1467-8489.12408>
- Lachaud, M. A., Bravo-Ureta, B. E., & Ludena, C. E. (2022). Economic effects of climate change on agricultural production and productivity in Latin America and the Caribbean (LAC). *Agricultural Economics*, 53(2), 321-332. <http://doi.org/10.1111/agec.12682>
- Lázari, N. C., & Magalhães, M. M. (2019). Crescimento da PTF segundo tamanho de estabelecimentos rurais na região Sudeste, de 1985 a 2006. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 57(2), 198-214. <http://doi.org/10.1590/1806-9479.2019.175194>
- Machado, G. C., Bacha, C. J. C., & Johnston, F. L. (2020). Revisão sistemática dos trabalhos que calculam a PTF da agropecuária brasileira. *Revista de Política Agrícola*, 29(1), 82-93. Recuperado em 4 de junho de 2024, de <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1488>
- Meeusen, W., & van den Broeck, J. (1977). Technical efficiency and dimension of the firm: Some results on the use of frontier production functions. *Empirical Economics*, 2(2), 109-122. <http://doi.org/10.1007/BF01767476>
- Môro, G. V., & Fritsche-Neto, R. (2015). Importância e usos do milho no Brasil. In A. Borém, J. C. C. G. Galvão, & M. A. Pimentel (Eds.), *Milho: do plantio à colheita* (pp. 9-25). Editora UFV.
- Njuki, E., Bravo-Ureta, B. E., & O'Donnell, C. J. (2019). Decomposing agricultural productivity growth using a random-parameters stochastic production frontier. *Empirical Economics*, 57(3), 839-860. <http://doi.org/10.1007/s00181-018-1469-9>
- O'Donnell, C. J. (2012). An aggregate quantity framework for measuring and decomposing productivity change. *Journal of Productivity Analysis*, 38(3), 255-272. <http://doi.org/10.1007/s11123-012-0275-1>
- O'Donnell, C. J. (2016). Using information about technologies, markets and firm behaviour to decompose a proper productivity index. *Journal of Econometrics*, 190(2), 328-340. <http://doi.org/10.1016/j.jeconom.2015.06.009>
- O'Donnell, C. J. (2018). Productivity and efficiency analysis. In J. Sengupta & B. Sahoo (Eds.), *Efficiency models in data envelopment analysis*. Singapore: Springer.
- Oliveira, L. J. C., Costa, L. C., Sedyama, G. C., Ferreira, W. P. M., & Oliveira, M. J. (2009). Mudanças climáticas e seus impactos nas produtividades das culturas do feijão e do milho no estado de Minas Gerais. In *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, Belo Horizonte, MG. Serra Talhada: SBAGRO.
- Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, 19(13), 3088-3111. <http://doi.org/10.1175/JCLI3790.1>
- Soares, P. (2017). *Determinantes de eficiência técnica da agricultura: um estudo para as culturas de milho e soja no Brasil* (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo, Piracicaba.

- Soares, P., & Spolador, H. F. S. (2019). Eficiência técnica da produção de milho no estado de São Paulo: uma abordagem por metafronteira estocástica. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 57(4), 545-558. <http://doi.org/10.1590/1806-9479.2019.183710>
- Souza, G. S., Gomes, E. G., & Alves, E. R. A. (2020). Uma visão da produção da agricultura brasileira com base em dados recentes do Censo Agropecuário. In J. E. R. Vieira Filho & J. G. Gasques (Eds.), *Uma jornada pelos contrastes do Brasil: cem anos do Censo Agropecuário* (pp. 39-50). Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). <http://doi.org/10.38116/978-65-5635-011-0/cap2>.
- Xavier, A. C., King, C. W., & Scanlon, B. R. (2016). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal of Climatology*, 36(6), 2644-2659. <http://doi.org/10.1002/joc.4518>

**Recebido:** Junho 04, 2024

**Aceito:** Julho 02, 2024

**JEL Classification:** D24; O13; O33