

Análise da convergência da produtividade da cana-de-açúcar por regimes espaciais para as microrregiões brasileiras

Convergence analysis of sugar cane productivity by spatial regimes for brazilian microregions

Renata Cattelan¹ , Pery Francisco Assis Shikida¹ , Alysso Luiz Stege² 

¹ Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Toledo (PR), Brasil. E-mails: renata.cattelan@gmail.com; pery.shikida@unioeste.br

² Programa de Pós-graduação em Economia, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa (PR), Brasil. E-mail: alyssonstege@gmail.com

Como citar: Cattelan, R., Shikida, P. F. A., & Stege, A. L. (2025). Análise da convergência da produtividade da cana-de-açúcar por regimes espaciais para as microrregiões brasileiras. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 63, e285404. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2025.285404pt>

Resumo: O objetivo desta pesquisa é avaliar se houve convergência na produtividade da terra para a cana-de-açúcar entre 2006 e 2017, e verificar a contribuição de algumas variáveis nessa convergência. Para atingir o objetivo, a metodologia adotada foi a econometria espacial, que busca controlar a dependência espacial, realizando os testes de convergência absoluta e condicional. Testou-se os modelos de convergência considerando a heterogeneidade da amostra, chamados de regimes espaciais. Os resultados comprovaram que está ocorrendo um processo de convergência absoluta e condicional da produtividade da cana-de-açúcar para as microrregiões brasileiras, ou seja, as diferenças de produtividade estão se reduzindo ao longo do tempo. A regressão por regimes espaciais pelo modelo SDEM se mostrou a mais adequada dentre os testes, por meio da qual foi possível observar que houve convergência para todas as grandes regiões brasileiras, mesmo que os processos e as intensidades tenham sido diferentes. Algumas variáveis explicativas, significativas e positivas para o modelo, foram: uso de adubação e colheita mecânica para o Centro-Oeste; mulheres dirigentes e mão de obra para o Nordeste; escolaridade dos dirigentes e mulheres dirigentes para o Norte; produtor arrendatário para o Sudeste; escolaridade do dirigente e orientação técnica para o Sul; dentre outras variáveis.

Palavras-chave: convergência, econometria espacial, heterogeneidade, produtividade.

Abstract: The objective of this research is to evaluate whether there was convergence in land productivity for sugarcane between 2006 and 2017, and to verify the contribution of some variables to this convergence. To achieve the objective, the methodology adopted was spatial econometrics, which seeks to control spatial dependence, performs absolute and conditional convergence tests. Convergence models considering the heterogeneity of the sample, called spatial regimes, were also tested. The results proved that a process of absolute and conditional convergence of sugarcane productivity occurs for Brazilian microregions, that is, differences in productivity are decreasing over time. The regression by spatial regimes using the SDEM model was shown to be the most appropriate among the tests, through which it was possible to observe that there was convergence for all major Brazilian regions, even if the processes and intensities were different. Some explanatory variables that were significant and positive for the model were: use of fertilizer and mechanical harvesting for the Midwest; women leaders and workforce for the Northeast; manager's education and women leaders for the North; tenant producer for the Southeast; manager's education and technical orientation for the South; among other variables.

Keywords: convergence, spatial econometrics, heterogeneity, productivity.

1 Introdução

O Brasil se destaca mundialmente pela expressão no setor primário, estando entre os maiores produtores e exportadores de vários produtos da pauta agropecuária, como soja e açúcar, por exemplo. Bacha (2012) evidencia as principais funções desempenhadas pelo setor primário no processo de desenvolvimento das nações, tais quais: fornecimento de alimentos e

matérias-primas, mercado consumidor para os outros setores, fornecimento de mão de obra, transferência de capitais para outros setores e geração de divisas por intermédio das exportações.

Tendo tal importância para a sociedade, o crescimento da produção rural é essencial e a produtividade tem se destacado como propulsora do crescimento agropecuário, pois poupa os fatores, como mão de obra, capital e área explorada. Do ponto de vista da economia, produtividade é a relação entre aquilo que é produzido e os meios que são empregados, ou seja, é a capacidade de produzir com determinada quantidade de fatores de produção. Assim, quanto mais se produz com a mesma quantidade de fatores, maior é a produtividade, que pode ser avaliada a partir de um fator produtivo específico ou do conjunto de fatores, as chamadas produtividade parcial e produtividade total dos fatores (Lopes, 2004a).

Para o Brasil, o aumento da produtividade agropecuária foi responsável por cerca de 87% do crescimento do produto total entre 2000 e 2007 (Gasques et al., 2008). Entre 2006 e 2017, a produtividade total dos fatores cresceu, em média, 2,21% ao ano, sendo que a taxa mundial foi de 1,71% ao ano no mesmo período (Vieira Filho, 2022). Isso quer dizer que, à medida que o crescimento agropecuário é advindo da produtividade dos fatores, e não do aumento absoluto deles, o crescimento tem características de poupar a expansão das fronteiras agrícolas, questão ímpar no processo de desenvolvimento do meio rural (Alves, 2010).

Gollin (2010) destaca que, pelo fato de boa parte da população com menor renda se concentrar em regiões rurais de países subdesenvolvidos, a produção agrícola (e, portanto, a produtividade) torna-se importante, além de tudo, para garantir renda e a sobrevivência dessa parcela da sociedade. Também é essencial para países com pauta exportadora primária, como é o caso do Brasil, para a entrada de divisas, o que contribui para o crescimento econômico.

Confirmando a importância da produtividade na agropecuária brasileira, muitos estudos foram feitos abordando esse tema, como: Gasques et al. (2004), Lopes (2004a), Almeida et al. (2008), Brigatte & Teixeira (2011), Felema et al. (2013), Raiher et al. (2016), Vieira Filho (2018, 2022), Baricelo (2019), Vedana et al. (2019), Machado et al. (2020), Hybner et al. (2020), Antunes (2021), Felema & Spolador (2023) dentre outros. Além destes, estudos internacionais também se dedicam a explorar a convergência absoluta e condicional, como: Martin & Mitra (2001), Arbia & Paelink (2003), Mukherjee & Kuroda (2003a), Paudel et al. (2004a), Landiyanto & Wardaya (2005), Dall'erba (2005), Sanén et al. (2007), Hamulczuk (2015), Chatterjee (2017), Murtaza & Masood (2020) e Gong (2020).

O objetivo desta pesquisa é avaliar se houve convergência na produtividade da terra para a cana-de-açúcar entre 2006 e 2017, e verificar a contribuição de algumas variáveis nessa convergência. Para atingir o objetivo, a metodologia adotada será a econometria espacial, que busca controlar a dependência espacial. Serão testados, também, os modelos de convergência, considerando a heterogeneidade da amostra, chamados de regimes espaciais.

Esta pesquisa está dividida em seis seções, inclusa esta introdução (1). Posteriormente, é apresentado um breve histórico e conceituação da convergência, assim como suas subdivisões, e uma revisão de literatura que busca contribuir para a comparação dos resultados aqui encontrados com outras pesquisas já realizadas, situando esta pesquisa, referente à similaridade e diferenças, com a literatura da área (2). A seção 3 apresenta os procedimentos metodológicos adotados e, na sequência, são expostos e discutidos os resultados (4). Finaliza-se com a seção de considerações finais (5).

2 Fundamentação Teórica

Esta seção permite identificar a evolução dos indicadores de convergência (2.1), a evolução histórica do setor canavieiro (2.2) e trabalhos empíricos que permitem visualizar variáveis que são determinantes da produtividade da cana-de-açúcar.

2.1 A hipótese da convergência

A convergência é um processo de redução da diferença ao longo do tempo entre diferentes localidades e para uma mesma variável. A convergência pode estar relacionada com inúmeras motivações, como a ação de políticas públicas, mudanças estruturais no processo produtivo, difusão de novas tecnologias, políticas macroeconômicas integradoras etc. (Lopes, 2004a).

A hipótese da convergência foi demonstrada pela primeira vez no modelo de crescimento econômico de Solow (1957), no qual a predição era de que economias mais pobres tendiam a alcançar economias mais ricas, visto que as diferenças eram eliminadas ao longo do tempo. O Modelo de Solow observava o comportamento do capital e do produto de países, levando em consideração que aqueles que, no momento inicial, tinham valores mais baixos do produto e capital, cresciam a uma taxa média maior do que aqueles que, no momento inicial, possuíam valores mais altos para as duas variáveis. Isso conduzia o conjunto de países à convergência por se aproximarem de um estado estacionário comum.

A partir desse modelo, muitos pesquisadores se propuseram a testar a hipótese da convergência em diferentes modelos e com diferentes recortes geográficos. A constatação levantada com relação à segunda metade do século XX foi que as diferenças de renda relativa entre países da África e Europa, por exemplo, aumentaram, o que não corrobora com as predições do Modelo de Solow (Gordon, 2000).

Testando essa hipótese, Romer (1986, 1987) e Lucas (1988) aperfeiçoaram o Modelo de Solow, incluindo as implicações dos retornos crescentes e do progresso técnico, bem como as formas endógenas de crescimento. Além disso, sinalizaram para a importância do capital humano no processo de crescimento econômico das nações. Jones (1997) esclarece, também, que a transferência de tecnologia entre regiões é um dos argumentos que pode explicar a convergência.

O conceito de convergência mais atual foi discutido por três trabalhos pioneiros, Barro & Sala-i-Martin (1990, 1991, 1992), dentre outras pesquisas, dos dois autores, que abordavam o tema. Os autores propõem três conceitos de convergência: *Convergência- β* , *Convergência- σ* e *Convergência- β condicional*.

A *Convergência- β* é um tipo de convergência total, denominada de absoluta, isso porque estima a convergência (a redução da diferença) em função da condição inicial da variável. Nesse sentido, a regressão estimada leva como variável dependente o logaritmo natural ($\ln$) da divisão entre a variável em seu momento final (Y_{t+n}) e a variável em seu momento inicial (Y_t), e como variável independente o $\ln$ da variável no momento inicial ($\ln Y_t$). A hipótese de *Convergência- β* é confirmada se o coeficiente associado ao parâmetro de $\ln Y_t$ for negativo e estatisticamente significativo. Isso porque, se a condição inicial é um fator negativo no crescimento da variável dependente, significa que quanto menor a condição inicial, maior será o crescimento da variável dependente.

A *Convergência- β* , apesar de fornecer resultados importantes de análise, não inclui fatores que podem ser responsáveis por essa convergência, além da situação inicial de cada local. A *Convergência- β condicional* procura atender a essa demanda, adicionando variáveis estruturais, que podem indicar o que proporciona o processo de convergência, além do fato da condição inicial.

Já a *Convergência- σ* observa a dispersão da variável de estudo medida pelo desvio-padrão do $\ln$, que reduz ao longo do tempo. Assim, a *Convergência- β* é uma condição necessária para que ocorra a *Convergência- σ* , mas não é suficiente para indicar se está ocorrendo dispersão da variável entre os locais. Esse modelo é utilizado para estimações em painel, visto que precisa dos dados de mais de um período para indicar a mudança na dispersão.

2.2 Evolução histórica do setor canavieiro e a produtividade

O debate teórico sobre convergência encontra um campo fértil de aplicação na agricultura, e foi debatido e estudado para inúmeros países e regiões. No caso da Índia, Mukherjee & Kuroda (2003b) identificaram que a convergência da PTF não ocorria de forma homogênea entre os estados, sendo maior entre aqueles com maior infraestrutura agrícola. Resultados semelhantes foram encontrados por Paudel et al. (2004a) nos Estados Unidos, onde o capital humano mostrou-se central para a redução das disparidades entre os estados.

Essas pesquisas dialogam com o processo de modernização agrícola ocorrido, impulsionado a partir da década de 1960 no Brasil, com a intensificação das políticas de crédito rural, assistência técnica e pesquisa agropecuária, lideradas por instituições como a Embrapa. No caso específico da cana-de-açúcar, a criação do Programa Nacional do Alcool (Proálcool) em 1975 e a posterior consolidação do setor sucroenergético contribuíram para o fortalecimento da cadeia produtiva por meio do desenvolvimento de variedades adaptadas, mecanização da colheita e verticalização da produção (Gazzoni, 2008; Martinelli & Filoso, 2008).

Nesse contexto, Azanha (2001, 2012) destaca que a dinâmica de modernização do setor canavieiro ocorreu de maneira desigual entre regiões brasileiras, sendo fortemente influenciada pela organização institucional da agroindústria, pela presença de políticas públicas e pela estrutura de contratos entre produtores independentes e usinas. Sua análise evidencia que os ganhos de produtividade não decorrem apenas da inovação tecnológica, mas também da coordenação entre agentes econômicos e da qualificação da força de trabalho rural. Isso reforça a importância de se considerar variáveis institucionais e sociais nos modelos de convergência.

Complementarmente, Guedes (2011) analisa a concentração fundiária e o modelo agroindustrial da cana-de-açúcar como condicionantes das desigualdades regionais de produtividade e renda. O autor argumenta que a produtividade agrícola é influenciada pela forma de organização da produção (propriedade *versus* arrendamento) e pela capacidade de investimentos das unidades produtivas.

Enfatizando esses outros autores, Terci (2010) contribui com análises sobre os impactos da modernização do setor sucroenergético nas relações de trabalho e na organização produtiva das regiões canavieiras. A reconfiguração espacial da produção de cana-de-açúcar, com o avanço sobre o Cerrado e o declínio em áreas tradicionais do Nordeste, reflete processos de reestruturação produtiva e econômica que afetam diretamente a produtividade. A autora ressalta que políticas públicas regionais, infraestrutura logística e acesso a serviços técnicos são variáveis determinantes para a inclusão ou marginalização de regiões na nova dinâmica do setor.

A pesquisa agrícola voltada à cana-de-açúcar teve papel importante no processo de modernização agrícola ocorrido, com destaque para o trabalho de instituições como o IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) e o CTC (Centro de Tecnologia Canavieira), responsáveis pelo desenvolvimento de cultivares com maior resistência, produtividade e adaptabilidade regional (Landell et al., 2012). Essa dinâmica favoreceu a concentração da produção nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, onde as condições edafoclimáticas e logísticas são mais favoráveis, intensificando as desigualdades regionais em termos de produtividade, assim como estudado por Terci (2010), Guedes (2011) e Azanha (2001, 2012).

Entretanto, o avanço da mecanização da colheita — impulsionado pela legislação ambiental que determinou o fim da queima da palha — representou um desafio adicional para regiões com menor capacidade de investimento, como o Nordeste. Estudos como os de Gasques et al. (2010) apontam que a produtividade total dos fatores na agricultura brasileira cresceu de forma heterogênea, sendo mais intensa nas regiões com maior densidade tecnológica e institucional, o que tem implicações diretas para a dinâmica da convergência.

Buscando por outras variáveis determinantes para a produtividade do setor canavieiro especificamente, Marin & Sentelhas (2011) investigaram os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade potencial da cana-de-açúcar na região Sul do Brasil. Eles utilizaram modelos agroclimáticos baseados em séries históricas meteorológicas e simulações de cenários. Concluíram que a precipitação e a temperatura possuem forte correlação com a produtividade, especialmente, em regiões com baixa capacidade de irrigação.

Marin et al. (2008) também avaliaram a eficiência da produção da cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil, demonstrando que a disponibilidade e qualidade dos solos, o nível de mecanização, a adoção de variedades adaptadas e o tipo de manejo (como a colheita mecanizada ou manual) impactam diretamente a produtividade. O estudo reforça que as regiões mais tecnificadas — como São Paulo e Mato Grosso do Sul — apresentam maior produtividade média e menor variabilidade interanual, o que sugere maior estabilidade e potencial de convergência entre microrregiões semelhantes. Também são variáveis importantes apresentadas por Marin et al. (2013) a infraestrutura logística e o capital humano local na eficiência da produção, indicando que a qualificação técnica dos trabalhadores é fator essencial para a adoção eficaz de novas tecnologias.

2.3 Revisão da literatura

Inúmeros pesquisadores trataram do processo de convergência da produtividade em casos nacionais e internacionais, buscando comprovar o processo de convergência da produtividade agrícola para países, regiões, estados e/ou para produtos.

Internacionalmente, o estudo de Mukherjee & Kuroda (2003a) explora a convergência da produtividade total dos fatores para a agricultura de 14 estados da Índia entre 1973 e 1993. Observou-se que não houve um único nível de convergência da produtividade. Por este motivo, agruparam os estados por nível de desempenho da produtividade. Deste modo, os resultados mostraram que os estados com alto desempenho possuem um movimento mais estável de convergência, enquanto os estados de baixo desempenho têm mais volatilidade nesse movimento. Para o grupo de baixo nível de desempenho, as variáveis que foram significativas incluem infraestrutura de irrigação, eletricidade, estradas e serviços de pesquisa e extensão, possibilitando a compreensão de que a atuação do Governo pode conduzir o país à redução da desigualdade da produtividade agrícola. Não houve evidências de que as diferenças de produtividade entre os dois grupos estivessem reduzindo, o que demonstra a persistência das desigualdades regionais na Índia.

Ampliando a análise da produtividade agrícola para um contexto distinto, Paudel et al. (2004b) analisaram 48 estados dos Estados Unidos de 1960 a 1996 e constataram a inexistência de um processo de convergência generalizado. Corroborando com Mukherjee & Kuroda (2003b), os autores identificaram padrões regionais diferenciados, mas atribuíram ao capital humano um papel central na explicação das disparidades de produtividade. Essa ênfase na qualificação da mão de obra como fator condicionante reforça a importância das variáveis estruturais e institucionais, ampliando a discussão para além da simples análise dos insumos físicos.

Essa perspectiva institucional também é aprofundada por Landiyanto & Wardaya (2005), que examinaram a indústria da cana-de-açúcar no Sudeste Asiático entre 1961 e 2000, com foco em países importantes para o setor, como Indonésia, Malásia, Tailândia, Camboja, Laos, Mianmar, Filipinas e Vietnã. Realizando uma análise em painel, concluíram que há um processo de convergência absoluta para o grupo e que a velocidade de convergência foi de 4% ao ano. Argumentaram que o desenvolvimento da indústria açucareira em cada país depende das políticas econômicas exercidas, como as restrições às importações e subsídios à produção e processamento que geram distorções na produtividade. Possibilita-se observar que há uma margem substancial para o aumento da produtividade, já que, internacionalmente, há padrões de produtividades maiores.

Complementando essa discussão, Dall'erba (2005) avaliou a evolução da convergência da produtividade do trabalho entre 1980-1996 para 48 regiões da Espanha. Embora tenha encontrado evidências de convergência agregada, o autor destacou que esta não se replicou nos setores agrícola, industrial e de serviços de forma desagregada. A relevância da dependência espacial, captada por meio do modelo de erro espacial, indica a influência das regiões vizinhas no desempenho produtivo. Essa contribuição é fundamental, pois sugere que fatores espaciais precisam ser considerados nas análises de convergência, sob o risco de se obterem resultados enviesados ou incompletos.

Isso também é reforçado por Chatterjee (2017), que testou a convergência da produtividade para a agricultura indiana entre 1967 e 2010, determinando que há convergência e há dependência espacial significativa na produtividade agrícola. As variáveis significativas e positivas do modelo de convergência condicional foram: estradas, eletricidade, irrigação, diversificação de culturas e qualidade do capital humano (escolarização rural). O autor conclui que, promover incentivos à infraestrutura e melhorias do capital humano podem conduzir à redução das disparidades regionais na Índia por meio dos transbordamentos espaciais. Similarmente, Dall'erba (2005), Chatterjee (2017) propõe que os transbordamentos espaciais são importantes para compreender a dinâmica regional da produtividade no meio rural, fortalecendo a importância dos modelos espaciais.

Seguindo essa abordagem metodológica, Murtaza & Masood (2020) também confirmaram a existência de convergência condicional e absoluta na agricultura indiana entre 1971 e 2010. Os fatores estruturais que contribuíram para a convergência — fertilizantes, irrigação, maquinário, acesso a estradas e número de cabeças de gado — dialogam diretamente com os achados anteriores e reforçam a tese de que a superação das desigualdades produtivas está diretamente vinculada à disponibilidade e uso de recursos produtivos modernos, bem como à infraestrutura.

A pesquisa de Gong (2020) amplia a análise para a China, testando a convergência da produtividade agrícola e as variáveis que condicionam essa convergência para 31 províncias e 23 produtos agrícolas, entre os anos de 1978 e 2015. Em contraste com os estudos anteriores, concluiu-se que, do total, 23 províncias e 19 produtos não obtiveram evidências de convergência. Porém, as variáveis que podem contribuir para aumentar a produtividade das províncias menos desenvolvidas – irrigação, educação e despesa pública – estão em linha com os determinantes identificados nas outras experiências internacionais, reafirmando a importância das políticas públicas.

Ao trazer o debate para o contexto brasileiro, a hipótese da convergência foi testada para diferentes culturas, para fatores específicos ou mesmo para a totalidade dos fatores. Dessa maneira, apresentam-se alguns trabalhos com o intuito de comparar pesquisas semelhantes aos resultados do estudo aqui proposto, tanto quanto à metodologia, como quanto à cultura utilizada, neste caso, a cana-de-açúcar.

Lopes (2004a) analisou a convergência absoluta e condicional da produtividade da terra para 11 culturas, dentre elas a cana-de-açúcar, para o período de 1960 a 2001, e observou que essa cultura apresentou convergência absoluta, mas não a convergência condicional. Uma das indicações da autora é que políticas econômicas poderiam melhorar a convergência, o que permitiria homogeneizar a produtividade por meio da modernização na agricultura brasileira.

Nesse mesmo sentido, Almeida et al. (2008) avaliaram a evidência de convergência da produtividade da terra para as microrregiões brasileiras entre 1991 e 2003. Utilizaram ferramental econométrico espacial e identificaram que existe convergência absoluta; contudo, a taxa é lenta. Isso quer dizer que, apesar da taxa de crescimento da produtividade estar em processo de convergência, isso está acontecendo de maneira demorada, deixando espaço para disparidades regionais. É uma indicação dos autores, assim como dos trabalhos discutidos anteriormente, que as políticas públicas sejam trabalhadas no sentido de que essa taxa de convergência seja maior.

Estudos mais recentes, como o de Raiher et al. (2016), investigaram a evolução da produtividade da agropecuária nas microrregiões do Sul do Brasil entre os Censos Agropecuários de 1995 e 2006. A metodologia utilizada foi a econometria espacial, e os resultados confirmaram a existência de convergência, absoluta e condicional, da produtividade para a referida região. Os resultados da convergência condicional demonstram que as características estruturais, como percentual de insumos por hectares e percentual de tratores por hectares, além da área explorada, são responsáveis por estimular essa convergência. Esses achados corroboram os resultados internacionais, que apontam para a importância dos fatores estruturais na redução das desigualdades produtivas.

Complementando o estudo realizado por Raiher et al. (2016), com dados atualizados pelo Censo Agropecuário de 2017, Hybner et al. (2020) estimaram a produtividade total dos fatores (PTF) para as microrregiões do Sul do Brasil, entre os Censos Agropecuários de 2006 e 2017, com o intuito de identificar a convergência de produtividade. Utilizando a econometria espacial, os resultados demonstraram que há uma tendência de convergência absoluta das taxas de crescimento da PTF para essa região. Para a convergência condicional, os resultados indicaram que a inclusão de variáveis estruturais, como a infraestrutura de armazenagem, acelera o processo de convergência. Além disso, foram positivas e significativas as variáveis de crédito e educação. Este estudo vai ao encontro dos resultados obtidos por outras pesquisas ao indicar a relevância dos fatores institucionais e estruturais.

No cenário nordestino, Albuquerque (2020) estimou a convergência para a produtividade agrícola das microrregiões da região Nordeste e para os municípios do Ceará, entre 1996 e 2017. Utilizando a econometria espacial para obter os resultados, constatou-se a existência de convergência absoluta e condicional, tanto para o Nordeste quanto para o Ceará. Além disso, há um processo de dependência espacial entre as microrregiões, o que demonstra que o espaço afeta o crescimento da produtividade. As variáveis que foram significativas para o modelo de convergência condicional foram a assistência técnica, a área total explorada, a mão de obra e o número de tratores, que dialogam com a literatura nacional e internacional apresentada, reafirmando a relevância da estrutura produtiva e institucional.

Considerando a heterogeneidade ecológica e produtiva brasileira, Antunes (2021) estudou a convergência da produtividade da agropecuária brasileira considerando regimes espaciais por biomas, entre 1995 e 2017. A autora concluiu que há um processo de convergência absoluta e condicional para as microrregiões brasileiras da Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica. Os fatores que foram significativos para que a produtividade convergisse, conforme o modelo, foram o crédito, número de tratores, mão de obra (negativa), conservação dos solos e Índice de Gini (negativa). O modelo captou a dependência espacial, bem como a heterogeneidade espacial, controlando-os por meio do modelo espacial de regimes espaciais.

Por fim, Castro (2022a) avaliou a convergência absoluta da produtividade da cana-de-açúcar para as microrregiões brasileiras e calculou a velocidade de convergência no período entre 1980 e 2019. Os resultados demonstraram que houve convergência absoluta, mas que sua magnitude diminuiu ao longo do tempo, assim como a velocidade da convergência, resultados obtidos também por Almeida et al. (2008). Castro (2022b) não utiliza a convergência condicional e indica que seria necessário testar variáveis que possam afetar a convergência produtividade, além da sua condição inicial.

Em síntese, nota-se pela pesquisa de trabalhos empíricos que há dificuldade em encontrar estudos que tenham abordado, especificamente, a cultura da cana-de-açúcar no que diz respeito à convergência da produtividade, principalmente, para períodos mais recentes. Além disso, não foram encontradas pesquisas que analisassem o setor canavieiro procurando modelar a heterogeneidade espacial juntamente com a dependência espacial, por meio da utilização dos regimes espaciais, por exemplo. Logo, esta pesquisa se diferencia das demais, pois pretende

suprir essa lacuna, testando a convergência absoluta e condicional da produtividade para este setor específico e procurando identificar e analisar se há padrão espacial da convergência, testando a existência de diferenças entre as regiões brasileiras.

3 Metodologia

Nesta seção serão demonstrados os procedimentos metodológicos utilizados para a implementação desta pesquisa. A abordagem é quantitativa, realizada com dados secundários.

Os modelos de convergência aqui apresentados têm por base estudos pioneiros, como Barro & Sala-i-Martin (1990, 1991, 1992), bem como em trabalhos mais atuais, como Lopes (2004a), Almeida et al. (2008), Raiher et al. (2016) e Antunes (2021). Esses trabalhos utilizaram conceitos de convergência absoluta e convergência condicional em suas estimativas. A convergência absoluta (*convergência- β*) é estimada pela regressão em que o logaritmo natural ($\ln$) da divisão entre a produtividade final (PT_{t+n}) e produtividade inicial (PT_t) é a variável dependente e o $\ln$ da produtividade inicial ($\ln PT_t$) é a variável independente, conforme Equação 1:

$$\ln\left(\frac{PT_{t+n}}{PT_t}\right) = \alpha + \beta \ln PT_t + \mu \quad (1)$$

Em que α e β são os parâmetros a serem estimados na regressão e μ é o termo de erro aleatório. Para que a convergência seja confirmada, o coeficiente associado ao parâmetro β deverá apresentar sinal negativo e significativo estatisticamente, o que confirma a hipótese de que, ao longo do tempo, as diferenças de produtividade tenderam a diminuir.

Para a convergência condicional (*Convergência- β condicional*) leva-se em consideração que a convergência depende das características estruturais e particulares de cada local e não somente de seu estado inicial, como na convergência absoluta. Dessa maneira, a situação de convergência não seria na direção de um único ponto de estado estacionário, mas de posições relativas de estado estacionário que são condicionadas por um vetor de variáveis estruturais X , como apresentado na Equação 2:

$$\ln\left(\frac{PT_{t+n}}{PT_t}\right) = \alpha + \beta_1 \ln PT_t + \beta_2 \ln X + \mu \quad (2)$$

Conforme especificado por Almeida (2012) e Raiher et al. (2016), os modelos das Equações (1) e (2) são estimados por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). No entanto, se existir dependência espacial entre as regiões de análise, essas estimativas seriam inconsistentes e/ou ineficientes. Logo, é necessário testar a existência de dependência espacial para abranger essas possibilidades.

Deste modo, segue-se os seguintes procedimentos:

- Estimar o modelo não espacial pelo MQO para diversas matrizes de ponderação espacial, e analisar se há dependência espacial e qual a matriz que captura a maior relação de dependência espacial;
- Caso haja dependência espacial, escolhe-se a matriz de ponderação espacial que capta a maior dependência espacial dos resíduos. Estimam-se os modelos de defasagem espacial (SAR), erro espacial (SEM), de Durbin espacial (SDM), de Durbin espacial do erro (SDEM) e o modelo regressivo cruzado (SLX) a partir da matriz definida no passo anterior;
- Testam-se os resíduos de todas as regressões espaciais do passo anterior e verifica-se qual modelo retirou ou reduziu mais a dependência espacial. Esse é um indicativo do melhor modelo. Almeida (2012) também propõe optar pelo modelo com o menor valor dos critérios de informação Akaike e Schwarz;

- d) Posteriormente, será testada a possibilidade da estimativa das regressões por regimes espaciais, por meio do teste de Chow espacial. Se o teste apresentar significância estatística, sugere que o melhor modelo é aquele que divide os dados em subamostras que representam regimes espaciais. No caso desta pesquisa, são as grandes regiões brasileiras (Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul); e
- e) Caso o melhor modelo seja aquele por regimes espaciais, repete-se os procedimentos de (b) e (c) para a escolha do melhor modelo.

O modelo a ser utilizado levará em consideração os procedimentos aqui descritos para obtenção dos resultados e definição do modelo mais adequado. Se comprovada a adequação ao modelo com regimes espaciais, a estimativa das regressões, assim como a defasagem espacial dos modelos com regimes espaciais, segue as mesmas especificações indicadas para os modelos sem regimes espaciais, conforme pode ser visto com mais detalhes em Almeida (2012).

Os dados serão coletados no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) para os anos de 2006 e 2017, conforme os dois últimos Censos Agropecuários disponíveis. Essa base de dados foi utilizada considerando que não são comuns dados específicos sobre a produção canavieira em âmbito nacional e subdivididos em microrregiões, e que os Censos Agropecuários conseguem abranger essa necessidade.

A opção pelo período temporal e análise *cross-section* considerou a limitação dos dados, já que as variáveis que o IBGE utiliza passaram por modificações entre os Censos Agropecuários de 1995/96, 2006 e 2017. Assim sendo, não foi possível captar as variáveis necessárias para realizar testes com estimativa em painel. O *software* utilizado para as estimações das regressões espaciais e por regimes espaciais será o GeoDa Space.

A unidade geográfica adotada serão as microrregiões brasileiras. Considerou-se utilizar os municípios; contudo, muitos municípios brasileiros não possuem produção canavieira, o que impossibilitaria a análise. Testou-se também a utilização de mesorregiões geográficas; contudo, reduz-se muito os graus de liberdade das estimações, especialmente, para as regressões com regimes espaciais.

Para captar as características e especificidades do setor, buscou-se, na literatura já citada, variáveis que pudessem ser condicionantes da produtividade. O setor canavieiro no Brasil apresenta características produtivas e institucionais que o diferenciam de outras cadeias do agronegócio, destacando-se pela complexa articulação entre agricultura e indústria, pela inserção estratégica no mercado de biocombustíveis e pelas profundas disparidades regionais. A expansão da cana-de-açúcar, sobretudo a partir da década de 1970, com a criação do Proálcool, contribuiu para a consolidação de um sistema agroindustrial verticalizado nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, onde predominam grandes propriedades, elevada mecanização, integração logística e maior densidade tecnológica (Gazzoni, 2008; Martinelli & Filoso, 2008; Marin et al., 2008). Nessas regiões, a produtividade é impulsionada por sistemas de gestão eficientes, acesso a crédito, infraestrutura de transporte e proximidade com as usinas. Em contrapartida, o Nordeste brasileiro, embora tradicional na cultura da cana-de-açúcar, enfrenta limitações estruturais, como menor escala produtiva, baixa mecanização, maior vulnerabilidade climática e dificuldades logísticas, o que impacta negativamente os níveis de produtividade e a estabilidade do setor (Guedes, 2011; Terceiro, 2010; Marin & Sentelhas, 2011).

Além da fragmentação regional, há forte heterogeneidade entre os agentes que compõem a produção canavieira. A coexistência de grandes grupos agroindustriais com produtores independentes e arrendatários resulta em diferentes capacidades de investimento, acesso à inovação e estratégias de inserção mercadológica (Azanha, 2001, 2012). Essa diversidade

estrutural interfere diretamente nos padrões de produtividade observados, visto que os pequenos e médios produtores enfrentam maiores restrições para adotar tecnologias modernas, contratar assistência técnica ou adequar-se às exigências ambientais e contratuais impostas pelas usinas (Terci, 2010; Lopes, 2004b). Além disso, aspectos como escolaridade dos dirigentes, gênero, uso de insumos modernos e participação em redes de assistência técnica influenciam o desempenho produtivo das unidades, conformando um setor marcado por múltiplas trajetórias e desigual acesso aos fatores de produção (Marin et al., 2013; Albuquerque, 2020; Guedes, 2011). Essa realidade justifica a importância de incorporar variáveis estruturais e espaciais em análises que buscam compreender a produtividade e a convergência regional da cana-de-açúcar no Brasil.

No Quadro 1 é possível observar as variáveis utilizadas nesta pesquisa. Optou-se por utilizá-las em formato de percentual para que fosse possível comparar regiões de tamanhos diferentes sem perder a intensidade da variável em cada local.

Quadro 1 – Descrição das variáveis utilizadas, seus respectivos acrônimos, ano e sinal esperado

Acrônimo	Variável	Ano	Sinal esperado
Y	Produtividade da terra (quantidade produzida / área colhida) para o ano de 2017 dividida pela produtividade da terra para o ano de 2006.	2017/2006	
X1	Produtividade da terra (quantidade produzida / área colhida) para o ano de 2006.	2006	-
X2	Percentual da quantidade produzida de cana-de-açúcar (ton.) que foi vendida.	2006	+
X3	Percentual da área colhida (ha) de cana-de-açúcar que utilizou adubação química ou orgânica.	2006	+
X4	Percentual da área colhida (ha) de cana-de-açúcar que utilizou somente colheita mecânica.	2006	+
X5	Percentual do total de estabelecimentos agropecuários (unidades) que produzem cana-de-açúcar.	2006	+
X6	Percentual da área colhida (ha) de cana-de-açúcar que utilizou agrotóxico.	2006	+
X7	Percentual de estabelecimentos agropecuários (unidades) que produzem cana-de-açúcar em que o dirigente (produtor ou administrador) possui pelo menos o ensino médio completo.	2006	+
X8	Percentual de estabelecimentos agropecuários (unidades) que produzem cana-de-açúcar que recebem orientação técnica.	2006	+
X9	Percentual de estabelecimentos agropecuários (unidades) que produzem cana-de-açúcar em que mulheres são dirigentes.	2006	+ ou -
X10	Percentual da quantidade produzida de cana-de-açúcar (ton.) que foi destinada para consumo humano ou animal.	2006	-
X11	Percentual do valor da produção (Reais) de cana-de-açúcar em que o produtor era arrendatário.	2006	+
X12	Número de trabalhadores (unidades equivalente-homem).	2006	+
X13	Índice de Gini da terra.	2006	+ ou -
X14	<i>Dummy</i> para a região Centro-Oeste.	-	+ ou -
X15	<i>Dummy</i> para a região Nordeste.	-	+ ou -
X16	<i>Dummy</i> para a região Sudeste.	-	+ ou -
X17	<i>Dummy</i> para a região Sul.	-	+ ou -
X18	Regimes espaciais – identificação das regiões brasileiras.	-	

Fonte: elaborado pelos autores.

A variável dependente (Y) é a divisão das produtividades do ano final (2017) e do ano inicial (2006). A produtividade foi calculada dividindo a quantidade produzida de cana-de-açúcar (toneladas) pela área colhida (ha). Essa variável representa a proporção da mudança ocorrida entre o ano inicial (2006) e o ano final (2017).

As variáveis independentes estão expressas por seus acrônimos de X1 a X18. A condição inicial de produtividade (X1) é importante para a determinação da convergência, objetivo desta pesquisa. A pretensão desta variável é indicar se, para aqueles locais em que a condição inicial de produtividade era menor, o crescimento foi maior em comparação com aqueles locais em que a produtividade inicial era maior. Por esse motivo, o sinal esperado da variável é negativo, visto que, sendo negativo, indica que quanto maior a produtividade inicial, menor a proporção de crescimento da produtividade em relação à posição final, conforme exposto por Barro & Sala-i-Martin (1990, 1991, 1992).

Para a variável X2 espera-se que, quanto maior a proporção da produção destinada à venda¹, maior a produtividade, já que quando os produtores destinam a produção para a venda, dedicam-se a obter maior qualidade e rentabilidade possível, possibilitando apontar, também, a maior integração do mercado, como analisado por Terci (2010) e Azanha (2012). É esperado ainda que, quanto maior o uso da adubação (X3), uso de colheita mecânica (X4) e uso de agrotóxicos (X6), maior a produtividade, considerando que esses elementos contribuem para a manutenção do solo, agilizam o processo de colheita e possibilitam minimizar as perdas relacionadas a pragas (Marin et al., 2008; Lopes, 2004b).

Para a variável X5, proporção de estabelecimentos que produzem cana-de-açúcar em relação ao total de estabelecimentos da microrregião, supõe-se que, em locais com aglomeração de municípios produtores de cana-de-açúcar, os transbordamentos de conhecimento, bem como a formação de cadeias de suprimentos, processamento e serviços relacionados, se desenvolvam, o que favorece a produção e o aumento da produtividade. Pode refletir, também, uma possível especialização regional (Guedes, 2011; Terci, 2010).

A variável X7 abrange o perfil de escolarização dos dirigentes dos estabelecimentos produtores de cana-de-açúcar. Considerou-se a proporção de estabelecimentos com dirigentes que possuíam, pelo menos, o ensino médio completo, contemplando o nível técnico, graduação e pós-graduação. Assim como indicado por Marin et al. (2013) e Chatterjee (2017), capital humano é fundamental para absorção de tecnologias e gestão eficiente da propriedade.

A possibilidade de contar com orientação técnica relativa à produção também é uma forma de produzir mais no mesmo espaço geográfico, variável analisada e considerada importante por autores como Albuquerque (2020) e Lopes (2004b), pois promove a difusão tecnológica e o uso adequado de insumos. Tendo isso em vista, a variável X8 foi incluída buscando considerar a proporção de estabelecimentos produtores de cana-de-açúcar que recebem orientação técnica em relação àqueles que não recebem.

Para a variável X9, a intenção é testar a possibilidade de diferenças na produtividade entre o fato do dirigente ser do sexo feminino ou masculino, conforme estudos de Terci (2010). A variável X10 representa a proporção da produção que é destinada para consumo humano ou animal nos estabelecimentos, em contraponto àquela parte que é destinada para beneficiamento ou produção de mudas. Espera-se que a variável X10 obtenha sinal negativo, como nas análises de Terci (2010) e Lopes (2004b), já que, quanto maior a produção para consumo humano ou animal, a tendência é que o dirigente do estabelecimento se preocupe menos com a qualidade ou com a produtividade da cana-de-açúcar, além de indicar menor inserção no mercado e menor especialização produtiva.

¹ Produção vendida refere-se ao nome da variável no Censo Agropecuário de 2006 e engloba: vendida ou entregue a cooperativas; vendida diretamente para indústrias; entregue à empresa integradora; vendida diretamente a intermediários; vendida, entregue ou doada ao governo; vendida diretamente ao consumidor; vendida como semente; exportada; vendida para consumo humano ou animal; vendida para transformação ou beneficiamento.

Procurando estabelecer se há diferenças devido à condição do produtor em relação à terra, será testada, também, a variável X11, que expressa a proporção da produção em que o produtor é arrendatário em relação àqueles que são proprietários da terra. Espera-se sinal positivo para esta variável, porque o arrendatário precisa pagar parte da produção para o dono da terra além de seu próprio lucro pessoal e, por isso, tende a buscar os melhores meios para aumentar a produtividade e rendimento em relação à terra. É uma característica da produção canavieira no Brasil o arrendamento de terras pelas agroindústrias para produzirem sua própria cana-de-açúcar. Portanto, essa variável também é importante, considerando seu potencial de influenciar o crescimento da produtividade (Terci, 2010; Lopes, 2004b).

Para compreender o fator produtivo relacionado ao trabalho, a variável X12 contempla a mão de obra em unidades, que foi convertida em equivalente-homem (EH), calculado de acordo com a indicação de Silva & Kageyama (1983). Essa variável foi utilizada em números absolutos e não em proporção como as demais, visto que a proporção de trabalho em relação ao total da maioria das microrregiões representava percentuais muito pequenos, o que dificulta as estimativas. Conforme estudado por Marin et al. (2008) e Raiher et al. (2016), pode-se supor que, quanto maior a força de trabalho, maior a capacidade produtiva, desde que esteja aliada à eficiência da mecanização.

O Índice de Gini da terra (X13) foi incluído buscando testar a relação entre a concentração de terras e o crescimento da produtividade. O Índice de Gini varia de 0 a 1 e, quanto mais próximo de 1, indica que há maior concentração da terra; e quanto mais próximo de 0, menor é a concentração de terras. Guedes (2011), Antunes (2021) e Azanha (2012) propõem que a alta concentração fundiária está associada à ineficiência produtiva. Contudo, para o setor canavieiro, que exige grandes quantidades de capital para que se possa adentrar no mercado, pode-se supor que a concentração produtiva leva à especialização e a maiores ganhos de escala. Assim, busca-se testar essa relação que pode contar com parâmetro tanto positivo quanto negativo.

Compreendendo que pode haver diferenças entre as grandes regiões brasileiras no que diz respeito à produtividade, foram inseridas variáveis *dummies* que contemplam as regiões (X14, X15, X16 e X17), sendo que a região Norte não foi inserida para não haver multicolinearidade perfeita. E a variável X18 também representa as regiões, mas será utilizada para testar as regressões por regimes espaciais.

No total, há 558 microrregiões no Brasil, porém foi necessário retirar da amostra 51 microrregiões (31 do Nordeste, 1 do Norte, 8 do Sudeste e 11 do Sul) que não possuíam dados da produção canavieira ou de área, impossibilitando o cálculo da variável dependente, restando, assim, 507 observações.

4 Resultados e Discussão

Inicialmente, foram realizados testes com as regressões clássicas (não espacial estimado por MQO) a fim de obter indícios da presença de dependência espacial na convergência, tanto absoluta quanto condicional (Apêndice A). A partir do teste do I de Moran dos resíduos foi possível afirmar que havia dependência espacial e que ela precisava ser incluída no modelo. Assim, foram testados os modelos SAR, SEM, SDM, SDEM e SLX para as convergências absoluta (Apêndice B) e condicional (Apêndice C). Determinou-se que o modelo mais adequado foi o SDEM para os dois tipos de convergência, considerando que apresentaram os menores valores dos critérios de informação de Akaike e Schwarz. Além disso, o modelo SDEM reduziu a dependência espacial medida pela estatística I de Moran dos resíduos, o que comprova que os modelos estimados foram capazes de acomodar, pelo menos, parte, a dependência espacial.

Ademais, era plausível supor que, além da dependência espacial, houvesse heterogeneidade da amostra dentro do recorte geográfico utilizado, considerando que o setor canavieiro possui profundas discrepâncias relacionadas à produção e à produtividade já observadas em trabalhos como o de Vedana et al. (2019).

Desse modo, realizou-se o teste de Chow espacial para a convergência absoluta (p -valor $< 0,01$) e condicional (p -valor $< 0,01$), que indicou o modelo por regimes espaciais como o mais adequado nos dois casos, em relação ao modelo global, sem os regimes espaciais. Além disso, provou, por meio da estatística do I de Moran dos resíduos (significativa estatisticamente com p -valor $< 0,01$, tanto para a convergência absoluta como condicional), que o modelo por regimes espaciais também comportava a dependência espacial, que necessitava ser incluída no modelo juntamente com a heterogeneidade.

Sendo assim, foram estimados os modelos de convergência absoluta e condicional por regimes espaciais SAR (Apêndice D e H), SEM (Apêndice E e I), SDM (Apêndice F e J), SDEM e SLX (Apêndice G e K), sendo que o modelo SDEM foi, também, o mais adequado para os dois casos, considerando a redução do valor dos critérios de informação, bem como a redução do I de Moran dos resíduos.

Os resultados do modelo SDEM de convergência absoluta com regimes espaciais confirmou que há um processo de convergência da produtividade, observado pelos resultados negativos e estatisticamente significativos da variável que representa a condição inicial (X_1) para todas as regiões brasileiras. É possível identificar que cada região possui um processo de dependência espacial diferente, com intensidades diferenciadas, determinadas pelos coeficientes da variável X_1 (Apêndice L).

Nesse modelo, o efeito da dependência global é demonstrado pelo λ global, que apresentou significância estatística ao nível de 5% e sinal do parâmetro positivo, apontando uma relação de similaridade entre as microrregiões captada pelos resíduos do modelo. A defasagem da variável explicativa (WX_1) foi positiva e significativa para as regiões Nordeste, Sudeste e Sul, demonstrando que o crescimento da produtividade nas microrregiões dessas regiões foi influenciado pelas condições iniciais das microrregiões circunvizinhas.

Para a estimativa do modelo SDEM para a convergência absoluta e condicional, assumiu-se a hipótese de que não havia multicolinearidade entre as variáveis independentes, considerando que o diagnóstico do *condition number* apresentou valores dentro dos níveis adequados.

Para cada um dos regimes foram ajustados os resultados de acordo com as correções necessárias: as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul apresentaram erros não normais (teste de Jarque-Bera) e heterocedasticidade dos resíduos (teste de Koenker-Bassett). Desse modo, o método utilizado para estimativa foi o GMM, que prescinde da normalidade dos erros. A correção de heterocedasticidade será feita pelo método KP HET. A região Nordeste obteve erros não normais; contudo, não apresentou heterocedasticidade. Assim, o método utilizado para estimativa foi o GMM. A região Norte, por sua vez, apresentou erros normais e ausência de heterocedasticidade; portanto, estimou-se o modelo utilizando o método de máxima verossimilhança (Kelejian & Prucha, 1999; Arraiz et al., 2010).

Na Tabela 1 são apresentados os resultados do modelo SDEM para a convergência condicional por regimes espaciais, que foi considerado o mais adequado, pois obteve a maior redução do valor do critério de informação de Akaike (passou de 806,534 para 789,131) e Schwarz (passou de 1102,529 para 1059,980), bem como apresentou a maior redução do I de Moran dos resíduos (passou de 0,0830 para 0,0503) após o controle da dependência espacial.

Tabela 1 – Resultados do modelo SDEM para a convergência condicional por regimes espaciais

Variáveis	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	3,1767**	2,3788**	3,6955**	2,2106***	2,6560*
X1	-0,8447*	-0,9167*	-0,9031*	-0,8612*	-0,9416*
X2	0,1491*	-0,0266	-0,1005*	0,0542	0,0941*
X3	0,1414**	0,0078	0,0270***	-0,0091	-0,0234***
X4	0,0485**	-0,0004	0,0337	0,0007	-0,0238**
X5	-0,2635**	0,0065	0,0395	0,0015	0,1011
X6	-0,0505	0,0059	-0,0426*	0,0019	0,0046
X7	-0,1056	0,0021	0,0273***	0,025	0,0288**
X8	-0,0882	-0,01211	0,0452	0,0560	0,0875**
X9	-0,0314	0,0319***	0,0702*	-0,0826	-0,0091
X10	-0,0094	-0,0294***	-0,0406	-0,0594**	-0,0176
X11	0,0299**	0,0094	-0,0544	0,0159**	0,0307*
X12	-0,0116	0,0268**	0,0425**	-0,0047	0,0097
X13	0,1655	-0,7075	-0,0467	-0,2553	-0,3150
WX1	-0,4375	0,0727	0,0908	0,1481	0,0449
WX2	0,2100	0,1111**	-0,1312	0,0956	0,0557***
WX3	0,1748	-0,0347	0,0267	0,0399	-0,0205
WX4	-0,1425*	-0,0645**	-0,0025	0,246	-0,0735*
WX5	0,0235	0,0017	-0,1730	-0,0887	-0,1570*
WX6	0,0755	0,0847*	-0,0421	-0,0372	0,0097
WX7	-0,4445***	0,0147	-0,0556	-0,037	-0,1153**
WX8	0,2451	0,0203	-0,0580	0,1143	0,1091
WX9	0,0128	-0,0458	0,1704**	-0,0020	-0,0635***
WX10	0,0692	0,0287	0,0631	0,0192	0,0471
WX11	0,0064	-0,0070	0,1817	0,0349**	0,1133*
WX12	0,0991**	0,0185	0,0459	-0,0357***	0,0313***
WX13	-1,5442	0,4149	-2,1042***	0,8747	0,2936
λ global	0,1701**				

Fonte: elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 789,131; Crit. Schwarz: 1059,980. I de Moran dos resíduos: 0,00503 (p-valor 0,036).

A variável X1 apresentou sinal negativo e estatisticamente significativo para todas as regiões brasileiras, ou seja, confirma-se que há um processo de convergência da produtividade da cana-de-açúcar entre as microrregiões brasileiras. O parâmetro de dependência espacial λ global foi significativo e apresentou sinal positivo, indicando que um choque aleatório, captado pelos resíduos do modelo, se propaga de uma região para outra contribuindo positivamente para o crescimento da produtividade. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Raiher et al. (2016) e Antunes (2021), que avaliaram a produtividade agropecuária como um todo, tanto pelo modelo mais adequado (SDEM) quanto pelo sinal e significância da variável X1 e do parâmetro λ .

Os diferentes parâmetros que captam a convergência e os diferentes coeficientes estimados das variáveis explicativas para cada região confirmam que há processos diferentes de convergência, e que cada região possui fatores significativos diferenciados que influenciam o crescimento da produtividade. Considerando isso, não seria adequado analisar a convergência da produtividade da cana-de-açúcar para as microrregiões brasileiras sem acrescentar no modelo a heterogeneidade espacial que cada grande região representa.

Isso está de acordo com os achados de outras pesquisas, mesmo que para outros setores ou variáveis (visto que há escassez de trabalhos que abordem, especificamente, a produtividade

canavieira testando a convergência por regimes espaciais), que evidenciaram a relevância das diferenciações regionais quando se trata da convergência, como Mukherjee & Kuroda (2003a), Paudel et al. (2004b), Dall'erba (2005) e Antunes (2021).

A variável X2 (percentual da produção que foi vendida) foi estatisticamente significativa e positiva para o Centro-Oeste e Sul, conforme esperado, haja vista o esforço e a necessidade de melhorar a produtividade quando o destino da produção é para a venda e, portanto, determina a renda do produtor. Contudo, a região Norte obteve sinal negativo e significativo, indicando que, quanto maior a proporção da produção vendida, menor o crescimento da produtividade. Apesar deste resultado ser contrário a outros resultados e indicativos da literatura, como Terci (2010) e Azanha (2012), isso pode estar relacionado ao próprio processo de convergência, já que naqueles locais, em que a produção era vendida no ano inicial da análise (2006), possivelmente, já contavam com produtividade superior e, portanto, cresceram menos em comparação àqueles que possuíam produtividades menores no ano inicial.

A variável X3 (percentual da área colhida com uso de adubação) foi positiva e significativa para o Centro-Oeste e Norte, assim como previsto, já que o uso de adubos químicos ou orgânicos no processo produtivo tende a aumentar a produtividade da terra, similar aos resultados encontrados por Raiher et al. (2016) para a produtividade agropecuária como um todo, e aos achados da pesquisa realizada para a Índia por Murtaza & Masood (2020). Também são mencionados, similarmente, em trabalhos como Marin et al. (2008) e Lopes (2004b). Porém, a região Sul obteve coeficiente negativo (significativo a 10%). A partir deste resultado levanta-se a hipótese de que pode estar relacionado às condições edafoclimáticas dessa região que, na maior parte, não são propícias para a cultura canavieira (especialmente em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul), possivelmente necessitando de maior adubação, o que pode não produzir efeitos compensatórios suficientes para gerar produtividades superiores.

Para o percentual de área colhida com uso somente de colheita mecânica (X4), houve significância e coeficiente positivo para o Centro-Oeste, e coeficiente negativo para o Sul. Murtaza & Masood (2020) obtiveram resultados positivos para o uso de máquinas na produção da agricultura indiana, Raiher et al. (2016) demonstraram esse resultado por meio do percentual de tratores por hectares para a agropecuária do Sul, assim como a pesquisa de Albuquerque (2020) e Antunes (2021). Centro-Oeste e Sul possuem diferenças consideráveis no relevo: o Centro-Oeste com relevo mais plano, o que proporciona a inserção da colheita mecânica; e o Sul com relevo mais acidentado, dificultando o uso da colheita mecânica. Assim, a região Sul, possivelmente, utiliza de colheita mecânica e manual conjuntamente ou somente a colheita manual, a média de uso de colheita mecânica da cana-de-açúcar para o Sul foi de 5,02%, enquanto para o Centro-Oeste foi de 12,47%.

Conforme proposição de Guedes (2011) e Terci (2010), a especialização produtiva pode gerar maior produtividade. Nesse sentido, foi inserida a variável X5 (proporção de estabelecimentos que produzem cana-de-açúcar), que obteve significância estatística somente para o Centro-Oeste, e apresentou sinal negativo. Esse resultado vai de encontro ao obtido por Albuquerque (2020) para a produtividade agrícola do Nordeste e por Raiher et al. (2016) para a produtividade da agropecuária do Sul. O resultado apresentado pelo Centro-Oeste para esta pesquisa, possivelmente está atrelado ao fato de que as regiões que possuem aglomerações produtivas de cana-de-açúcar possuem uma homogeneização maior da produtividade, gerando um crescimento menor. Esse processo é especificado pela própria convergência, que estabelece que aqueles locais com menores produtividades possuem crescimento maior em contraposição àqueles que inicialmente já possuíam alta produtividade.

A variável X6 (percentual da área colhida que utilizou agrotóxico) foi significativa e negativa somente para a região Norte. Apesar de contrariar a expectativa do sinal da variável, considera-se

que áreas que necessitam de maiores quantidade de agrotóxicos são mais propensas, também, à ataque de pragas, o que podem reduzir consideravelmente a produtividade em determinadas safras. No caso do teste de convergência aqui realizado, o uso de agrotóxico considerado diz respeito à condição inicial (2006), enquanto o crescimento da produtividade refere-se à comparação entre as safras de referência dos Censos de 2006 e 2017.

A condição de escolarização do dirigente foi abrangida pela variável (X7), que compreende à proporção de estabelecimentos em que o dirigente tinha, pelo menos, o ensino médio completo. Foi estatisticamente significativa e positiva, conforme preconizado, para as regiões Norte e Sul, sugerindo que, quanto maior a proporção de escolarização nessas regiões, maior o aumento da produtividade. É esperado que as condições de escolaridade atuem positivamente, já que proporcionam maior acesso a conhecimentos produtivos e tecnologias, corroborado por pesquisas nacionais e internacionais, como as de: Marin et al. (2008), Chatterjee (2017), Paudel et al. (2004b) para a produtividade agrícola dos Estados Unidos; Chatterjee (2017) para a produtividade da agricultura na Índia; Gong (2020) para a produtividade agrícola na China; e Hybner et al. (2020) para a produtividade total dos fatores no Sul do Brasil.

O percentual de estabelecimentos que recebem orientação técnica (X8) obteve coeficiente positivo e significativo ao nível de 5% para a região Sul, similar aos resultados obtidos por Albuquerque (2020) e Lopes (2004b). Isso significa que, para essa região, aquelas microrregiões que, no período inicial contavam com maior proporção de recebimento de orientação técnica, obtiveram maior crescimento da produtividade entre o período inicial e final. Isso era presumido, já que a orientação técnica proporciona direcionamentos produtivos importantes que podem melhorar as diversas fases da cadeia produtiva. A relação positiva entre orientação técnica e maior produtividade foi observada também pelos trabalhos de Albuquerque (2020), para as microrregiões do Nordeste brasileiro, e Mukherjee & Kuroda (2003a), para a produtividade total dos fatores na agricultura indiana.

Terci (2010) expõe a possibilidade de uma diferenciação no meio rural a partir dos gêneros. Pensando nesse aspecto, inseriu-se a variável X9 (percentual de mulheres dirigentes), que se mostrou positiva e significativa para o Nordeste e Norte. Essa variável não possuía um direcionamento de sinal esperado, já que o objetivo era testar se havia diferença pelo fato de o dirigente ser homem ou mulher. É um resultado de destaque o impacto positivo no crescimento da produtividade da cana-de-açúcar quando a dirigente da propriedade era mulher, o que pode ser explicado pelas condições de escolarização das mulheres, que têm uma tendência crescente, como constatado por Vicente, Baptistella & Francisco (2005). Os autores elucidam o fato de que as mulheres, no meio rural, são responsáveis por buscar informações, como preços, gastos e alternativas de investimentos, o que colabora para que sejam responsáveis pela tomada de decisões, e que façam isso de maneira mais assertiva. Camargo (2018) também encontra resultados que assinalam as mulheres que trabalham na agropecuária como mais escolarizadas, e que têm a tendência de mostrarem novas formas de administração, realizando cursos e adaptando-se ao mercado. Além disso, o Nordeste e Norte possuem percentuais de mulheres dirigentes acima da média do Brasil, com 10,5% e 9,3%, respectivamente, comparado à média brasileira de 9,08%, sendo que as demais regiões encontram-se abaixo dessa média.

Para o percentual da produção destinada ao consumo humano ou animal (X10), o Nordeste e Sudeste contaram com coeficientes negativos e significativos, corroborando com as especificações de Terci (2010) e Lopes (2004b). Logo, quanto maior a proporção da produção destinada ao consumo na microrregião, menor o crescimento da produtividade. Esperava-se esse resultado, já que a produção destinada para o consumo humano ou animal não necessita de alta produtividade, alocando-se com um complemento para os produtores.

A variável X11 (percentual da produção em que o produtor é arrendatário) teve comportamento positivo e significativo para o Centro-Oeste, Sudeste e Sul, mostrando que, quanto maior a proporção da produção de arrendatários, maior o crescimento da produtividade. Presumia-se que esta variável contasse com sinal positivo, primeiramente pelas condições brasileiras de que as próprias usinas arrendam terras para produzir sua matéria-prima (Terci, 2010). Segundo, porque aqueles produtores que utilizam as terras como arrendatários precisam garantir que a produção seja suficiente para pagar o arrendamento, além de proporcionar lucros produtivos. Dessa forma, é esperado que o produtor insira esforços para aumentar a produtividade da terra ao máximo, tanto a usina quando o produtor pessoa física.

A mão de obra (X12) foi positiva e significativa para o Nordeste e Norte, o que possibilita compreender que essas regiões utilizaram o fator produtivo trabalho para aumentar a produtividade no período abrangido pela análise; enquanto a região Centro-Oeste, por exemplo, expressou seu crescimento em função da colheita mecânica, que representa, em parte, a inserção do capital no processo produtivo. A relação positiva entre mão de obra e crescimento da produtividade foi observada também na pesquisa de Albuquerque (2020) para a produtividade agrícola das microrregiões do Nordeste brasileiro. Foi proposta também pelos estudos de Marin et al. (2008) e Raiher et al. (2016).

O Índice de Gini da terra (X13) foi uma variável testada a fim de compreender se havia relação entre a concentração de terras e o maior ou menor crescimento da produtividade, de acordo com Guedes (2011), Antunes (2021) e Azanha (2012). Contudo, não foi estatisticamente significativa para nenhuma região; logo, não se pode afirmar que ela tenha algum impacto, negativo ou positivo, sobre a produtividade no âmbito desta pesquisa.

As variáveis independentes defasadas expressas pelos acrônimos de *WX1* a *WX13*, representam o efeito local dessas variáveis, na média dos vizinhos, sobre a variável dependente na microrregião de análise. Assim, elas podem ser interpretadas de modo similar às variáveis sem a defasagem, mas considerando que, quando são significativas e positivas, o crescimento da produtividade de uma microrregião, daquela grande região, é influenciado positivamente pelo crescimento da variável explicativa na média das regiões vizinhas. Por sua vez, quando apresentam sinal negativo, são interpretadas como influentes negativamente no crescimento da produtividade do município de referência, quando cresce essa variável explicativa na média das microrregiões circunvizinhas.

O Quadro 2 fornece uma visão resumida dos resultados do modelo final, que captura tanto a dependência espacial quanto a heterogeneidade espacial para as convergências absoluta e condicional. É possível observar a relação entre a variável dependente e as variáveis explicativas, que foram significativas estatisticamente para cada uma das grandes regiões brasileiras. Também se pode analisar o sinal do coeficiente de cada variável e a relação das variáveis no modelo, explicativas ou explicativas com defasagem espacial. A primeira conclusão é a de que existe um processo de convergência da produtividade da cana-de-açúcar no Brasil quando observadas as microrregiões, tanto para o modelo como um todo quanto para as regiões separadamente.

Importa salientar que cada região contou com variáveis significativas diferenciadas, o que é capturado exatamente pela análise por meio dos regimes espaciais. Fazendo uma análise geral ao observar as variáveis por região, pode-se compreender que o crescimento da produtividade no Centro-Oeste é focado na produção para processamento, baseada em capital inserido na produção, como a utilização de colheita mecânica e adubação. Já o Nordeste possui uma relação positiva entre crescimento da produtividade e mão de obra, assim como mulheres dirigentes dos estabelecimentos, orientado, por sua vez, para o fator produtivo referente ao trabalho.

Quadro 2 – Resumo dos resultados expressos pela relação entre a variável dependente e as variáveis explicativas significativas do modelo de convergência condicional por regimes espaciais

Região/ Relação com variável dependente	Positiva para variáveis explicativas	Negativa para variáveis explicativas	Positiva para variáveis explicativas defasadas	Negativa para variáveis explicativas defasadas
Centro-Oeste	- Produção vendida. - Uso de adubação.	- Produtividade inicial.	- Mão de obra.	- Colheita mecânica.
	- Colheita mecânica. - Produtor arrendatário.	- Estabelecimentos que produzem cana.		- Escolaridade do dirigente.
Nordeste	- Mulheres dirigentes.	- Produtividade Inicial.	- Produção vendida.	- Colheita mecânica.
	- Mão de obra.	- Produção para consumo.	- Uso de agrotóxico.	
Norte	- Uso de adubação.	- Produtividade inicial.	- Mulheres dirigentes.	- Índice de Gini da terra.
	- Escolaridade do dirigente.	- Produção vendida.		
	- Mulheres dirigentes.	- Uso de agrotóxico.		
	- Mão de obra.			
Sudeste	- Produtor arrendatário.	- Produtividade inicial.	- Produtor arrendatário.	- Mão de obra.
		- Produção para consumo.		
Sul	- Produção vendida.	- Produtividade inicial.	- Produção vendida.	- Colheita mecânica.
	- Escolaridade do dirigente.	- Uso de adubação. - Colheita mecânica.	- Produtor arrendatário.	- Estabelecimentos que produzem cana.
	- Orientação técnica. - Produtor arrendatário.		- Mão de obra.	- Escolaridade do dirigente. - Mulheres dirigentes.

Fonte: elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa.

Destacando os principais resultados para a região Norte, nota-se que a escolaridade do dirigente do estabelecimento proporcionou uma relação positiva com o crescimento da produtividade; enquanto o uso de agrotóxicos, por exemplo, expressou uma relação negativa com a produtividade, possivelmente, pelo fato de que a necessidade do uso de agrotóxico indica a possibilidade de perdas produtivas por ações de pragas.

Para o Sul, pode-se evidenciar que foi a única região que obteve significância para a variável orientação técnica, que contribui para o crescimento da produtividade, além de outras variáveis já discutidas.

5 Conclusões

Concluiu-se, portanto, que, além da relação espacial existente entre o crescimento da produtividade da cana-de-açúcar para as microrregiões brasileiras, há também a necessidade de considerar as diferenças regionais inerentes desse setor. Historicamente, foi um setor com dinâmicas específicas em cada local, mudando o centro produtor do Nordeste para o Sudeste, com o Sudeste assumindo a liderança no desenvolvimento e implementação de tecnologias. A produção do Sudeste acabou transbordando para o Paraná e para a região Centro-Oeste, sendo esta última demonstrando aptidão para a produção canavieira.

Nesse contexto, a convergência da produtividade é importante por induzir as regiões a padrões produtivos de excelência, proporcionando melhorias na renda dos produtores no meio rural. Mesmo considerando as especificidades produtivas de cada região brasileira, esta pesquisa possibilita afirmar que as diferenças de produtividade da cana-de-açúcar têm se reduzido entre as microrregiões brasileiras e que a redução dessas diferenças está atrelada, sobretudo na região Centro-Oeste, ao uso de adubação e colheita mecânica, variáveis que podem ser estimuladas a fim de reduzir ainda mais as discrepâncias.

Na região Nordeste, o crescimento da produtividade pode ser estimulado aumentando a proporção da produção que é processada/vendida/industrializada (considerando a relação negativa com a variável X10). Para o Norte, a melhoria da produtividade está ligada a variáveis como o uso de adubação e escolarização, que também podem ser motivadas por ações estatais, por exemplo. Na região Sudeste, maior produtora nacional, a produção para o consumo também age negativamente na produtividade, assim como na região Nordeste. E, para o Sul, escolaridade e orientação técnica são importantes ferramentas de redução das desigualdades da produtividade da cana-de-açúcar.

Compreende-se que há espaço para ações do Governo, assim como ações privadas, que visem melhorar a produtividade e, portanto, a renda no meio rural, estimulando as variáveis anteriormente descritas, considerando, de todo modo, que essas ações não podem ser as mesmas em todas as regiões brasileiras.

Esta pesquisa visou contribuir com a literatura acerca da produtividade da cana-de-açúcar, testando a convergência e variáveis explicativas da convergência, além de ponderar as diferenças regionais brasileiras por meio dos regimes espaciais, considerando que não foram encontradas pesquisas que realizassem tais testes para o período, para o recorte geográfico utilizado e com essa metodologia.

Indica-se que pesquisas futuras sejam realizadas utilizando outros recortes geográficos e testando, especialmente, outros fatores que possam estar influenciando a redução das desigualdades da produtividade da cana-de-açúcar. Ademais, pesquisas de campo focadas também podem contribuir para elucidar novos fatores que proporcionam a convergência.

Contribuições dos autores:

RC: Concepção e desenho do estudo, Coleta de dados, Análise e interpretação, Redação do manuscrito. PFAS: Concepção e desenho do estudo, Coleta de dados, Análise e interpretação, Revisão crítica. ALS: Coleta de dados, Análise e interpretação, Revisão crítica.

Suporte financeiro:

Nada a declarar.

Conflitos de interesses:

Nada a declarar.

Aprovação do conselho de ética:

Não se aplica.

Disponibilidade de dados:

Os dados de pesquisa estão disponíveis somente mediante solicitação.

* Autor correspondente:

Renata Cattelan. renata.cattelan@gmail.com

6 Referências

- Albuquerque, W. M. (2020). *Análise de convergência espacial de produtividade agrícola aplicada à região nordeste do Brasil e aos municípios do Estado do Ceará* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Almeida, E. (2012). *Econometria espacial aplicada*. Campinas: Editora Alínea.
- Almeida, E. S., Perobelli, F. S., & Ferreira, P. G. C. (2008). Existe convergência espacial da produtividade agrícola no Brasil? *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 46(1), 31-52.
- Alves, E. (2010). O que significam as medidas de produtividade da agricultura? *Revista de Economia e Agronegócio*, 8(3), 349-370.
- Antunes, L. A. (2021). *Convergência da produtividade agropecuária: uma análise considerando regimes espaciais por biomas entre os anos de 1995 e 2017* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.
- Arbia, G., & Paelink, H. P. (2003). Economic convergence or divergence? Modeling the interregional dynamics of EU regions, 1985-1999. *Journal of Geographical Systems*, 5(1), 291-314.
- Arraiz, I., Drukker, D. M., Kelejian, H. H., & Prucha, I. R. (2010). A spatial Cliff-Ord-type model with heteroskedastic innovations: Small and large sample results. *Journal of Regional Science*, 50(1), 592-614.
- Azanha, M. F. D. M. (2001). *Organização da produção canavieira no Brasil: Relações entre indústria e agricultura*. São Paulo: UNICAMP/IE.
- Azanha, M. F. D. M. (2012). Produtividade e organização da agroindústria canavieira no Brasil. In A. M. Buainain, E. Alves, J. M. Silveira, & Z. Navarro (Orgs.), *O mundo rural no Brasil do século 21: a formação de um novo padrão agrário e agrícola* (pp. 677-698). Brasília: Embrapa.
- Bacha, C. J. C. (2012). *Economia e política agrícola no Brasil* (2. ed.). São Paulo: Atlas.
- Baricelo, L. G. (2019). *Dinâmica e convergência da produtividade total dos fatores na agropecuária brasileira entre 1975 e 2006* (Tese de doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Barro, R. J., & Sala-i-Martin, X. (1990). *Economic growth and convergence across the United States*. Cambridge: National Bureau of Economic Research.
- Barro, R. J., & Sala-i-Martin, X. (1991). Convergence across states and regions. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1, 107-158.
- Barro, R. J., & Sala-i-Martin, X. (1992). Convergence. *Journal of Political Economy*, 100(2), 223-251.
- Brigatte, H., & Teixeira, E. C. (2011). Determinantes de longo prazo do produto e da Produtividade Total dos Fatores da agropecuária brasileira no período 1974-2005. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 49(4), 815-836.
- Camargo, T. P. (2018). *Os desafios encontrados na inserção da mulher no agronegócio* (Monografia). Faculdade Evangélica de Jaraguá, Jaraguá.

- Castro, E. A. (2022a). *Convergência da produtividade da cana-de-açúcar no Brasil: Evidências regionais entre 1980 e 2019* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- Castro, L. S. (2022b). Panorama recente da cana-de-açúcar no Brasil: aspectos da convergência espacial na produtividade. *Revista Econômica do Nordeste*, 53(2), 27-40.
- Chatterjee, T. (2017). Spatial convergence and growth in indian agriculture: 1967-2010. *Journal of Quantitative Economics*, 15(1), 121-149.
- Dall'erba, S. (2005). Productivity converge and spatial dependence among Spanish regions. *Journal of Geographical Systems*, 7(1), 207-227.
- 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), 1-19.
- Felema, J., Raiher, A. P., & Ferreira, C. R. (2013). Agropecuária brasileira: desempenho regional e determinantes de produtividade. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 51(3), 555-574.
- Gasques, J. G., Bastos, E. T., & Bacchi, M. R. P. (2008). Produtividade na agricultura brasileira. *Agroanalysis*, 28(8), 47-48.
- Gasques, J. G., Bastos, E. T., & Bacchi, M. R. P. (2010). Produtividade e fontes de crescimento da agricultura brasileira. *Revista de Política Agrícola*, 19(1), 20-34.
- Gasques, J. G., Bastos, E. T., Bacchi, M. P. R., & Conceição, J. C. P. R. (2004). Condicionantes da produtividade da agropecuária brasileira. *Revista de Política Agrícola*, 13(3), 73-90.
- Gazzoni, D. L. (2008). Inovação tecnológica e competitividade do agronegócio brasileiro. *Informações Econômicas*, 38(6), 7-20.
- Gollin, D. (2010). Agricultural productivity and economic growth. *Handbook of Agricultural Economics*, 4(1), 3825-3866.
- Gong, B. (2020). Agricultural productivity and convergence: evidence from China. *China Agricultural Economic Review*, 12(1), 46-65. <http://dx.doi.org/10.1108/CAER-04-2019-0060>
- Gordon, R. J. (2000). *Macroeconomia* (7. ed.). Porto Alegre: Bookman.
- Guedes, S. N. (2011). *Economia política da cana: agroindústria, território e desenvolvimento regional*. São Paulo: Annablume.
- Hamulczuk, M. (2015). Total factor productivity convergence in the EU agriculture. In *International Conference on Competitiveness of Agro-food and Environmental Economy Proceedings* (Vol. 4, pp. 34-43). Bucharest: Bucharest University of Economic Studies.
- Hybner, B. R., Parré, J. L., & Afonso, J. F. (2020). Convergência da produtividade total dos fatores da agropecuária no Sul do Brasil. *Revista de Política Agrícola*, 29(4), 47-64.
- Jones, C. (1997). *Introdução à teoria do crescimento econômico*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Kelejian, H. H., & Prucha, I. R. (1999). A generalized moments estimator for the autoregressive parameter in a spatial model. *International Economic Review*, 40(2), 509-533.
- Landell, M. G. A., Xavier, M. A., & Figueiredo, P. (2012). Variedades de cana-de-açúcar: Estratégias e perspectivas para o setor sucroenergético brasileiro. *Stab: Açúcar, Alcool e Subprodutos*, 30(2), 30-36.
- Landiyanto, E. A., & Wardaya, W. (2005). Growth and Convergence in Southeast Asia Sugarcane Industries. *Majalah Ekonomi Universitas Airlangga*, 16(2), 1-18.
- Lopes, J. L. (2004a). *Avaliação do processo de convergência da produtividade da terra na agricultura brasileira no período de 1960 a 2001* (Tese de doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

- Lopes, M. J. S. (2004b). *Convergência da produtividade da terra para a agricultura brasileira* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Lucas, R. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3-42.
- 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.
- Marin, F. R., & Sentelhas, P. C. (2011). Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climatic Change*, 109(3-4), 655-666. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0057-5>
- Marin, F. R., Cunha, A. R., & Assad, E. D. (2013). Simulação da produtividade da cana-de-açúcar em escala regional utilizando o modelo CANEGRO. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(6), 638-645. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000600011>
- Marin, F. R., Nassif, D. S. P., Monteiro, J. E. B. A., & Assad, E. D. (2008). Sugarcane crop efficiency in Brazil: a regional overview. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(12), 1553-1561. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008001200002>
- Martin, W., & Mitra, D. (2001). Productivity growth and convergence in agriculture versus manufacturing. *Economic Development and Cultural Change*, 49(2), 403-422.
- Martinelli, L. A., & Filoso, S. (2008). Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: Environmental and social challenges. *Ecological Applications*, 18(4), 885-898. <http://dx.doi.org/10.1890/07-1813.1>
- Mukherjee, A. N., & Kuroda, Y. (2003a). Productivity growth in Indian agriculture: is there evidence of convergence across states? *Agricultural Economics*, 29(1), 43-53.
- Mukherjee, A., & Kuroda, Y. (2003b). Convergence in agricultural productivity across the Indian States: a panel study. *Indian Economic Review*, 38(2), 89-105.
- Murtaza, M., & Masood, T. (2020). Inter-district variations in agricultural productivity in India. *Agricultural Economics Research Review*, 33(2), 219-228.
- Paudel, K. P., Sambidi, P. R., & Sulgham, A. K. (2004a). A theoretical development and empirical test on the convergence of agricultural productivity in the USA. *Agricultural and Applied Economics Association*, 377, 1-24.
- Paudel, K. P., Zapata, H. O., & Susanto, D. (2004b). An analysis of regional agricultural productivity in the US: 1960-1996. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 36(1), 1-14. <http://dx.doi.org/10.1017/S107407080000971X>
- Raiher, A. P., Oliveira, R. A., Carmo, A. S. S., & Stege, A. L. (2016). Convergência da produtividade agropecuária do Sul do Brasil: uma análise espacial. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 54(3), 517-536.
- Romer, P. M. (1986). Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 94(5), 1002-1037. <http://dx.doi.org/10.1086/261420>
- Romer, P. M. (1987). Growth based on increasing returns due to specialization. *The American Economic Review*, 77(2), 56-62.
- Sanén, N. E. A., Romero, L. Q., & Hernández, R. R. (2007). Convergencia espacial y concentración regional agrícola en México 1970-2003: problemas del desarrollo. *Revista Latinoamericana de Economía*, 38(149), 79-111.
- Silva, J. G., & Kageyama, A. A. (1983). Emprego e relações de trabalho na agricultura brasileira: uma análise dos dados censitários de 1960, 1970 e 1975. *Pesquisa e Planejamento Econômico*, 13(1), 235-255.

- Solow, R. M. (1957). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94.
- Terci, E. (2010). Transformações recentes na agroindústria canavieira: territorialização e reestruturação produtiva. In E. R. A. Alves & A. M. Buainain (Orgs.), *O novo rural brasileiro: Transformações estruturais, institucionalidade e políticas públicas* (pp. 267-292). Brasília: IICA/Embrapa.
- Vedana, R., Rodrigues, K. C. T. T., Parré, J. L., & Shikida, P. F. A. (2019). Distribuição espacial da produtividade de cana-de-açúcar no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, 25(3), 121-133.
- Vicente, M. C. M., Baptistella, C. S. L., & Francisco, V. L. F. S. (2005). Evolução do mercado de trabalho na agropecuária paulista, 1995-2004. In *XLIII Congresso da SOBER: Instituições, Eficiência, Gestão e Contratos no Sistema Agroindustrial*. Brasília: SOBER.
- Vieira Filho, J. E. R. (2018). *Efeito poupa-terra e ganhos de produção no setor agropecuário brasileiro* (Texto para Discussão, No. 2386, pp. 1-41). Brasília: Ipea.
- Vieira Filho, J. E. R. (2022). *Indicadores de produtividade e sustentabilidade do setor agropecuário brasileiro* (Nota Técnica, No. 29). Brasília: Ipea. Recuperado em 09 de abril de 2024, de https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11106/2/NT_29_Dirur_Indicadores_de_produtividade.pdf

Data de submissão: 09 de abril de 2024.

Data de aceite: 04 de junho de 2025.

Classificação JEL: R12.

Editor de seção: Yuri Calil

APÊNDICE A – RESULTADOS DO MODELO NÃO ESPACIAL PARA A CONVERGÊNCIA ABSOLUTA

Variáveis/Testes	Coefficiente
Constante	1,8886*
X1	-0,5576*
R ²	0,4513
Multicolinearidade (<i>Condition Number</i>)	6,423
Jarque-Bera	44,690*
Breusch-Pagan	8,147*
Koenker-Bassett	6,362**
White	8,307*
I Moran do resíduo	0,2572*
Crit. informação Akaike	972,157
Crit. Schwarz	980,614

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%.

APÊNDICE B – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS PARA OS MODELOS SAR, SEM, SDM E SLX PARA A CONVERGÊNCIA ABSOLUTA

Variáveis/Testes	Modelos			
	SAR	SEM	SDM	SLX
Constante	2,226*	2,3233*	0,5560	1,1845*
X1	-0,6385*	-0,6925*	-0,7520*	-0,7093*
WX1	-	-	0,5917*	0,3690*
λ	-	0,5393*	-	-
ρ	-0,9578*	-	0,5778***	-
Pseudo R ²	0,2617	0,4513	0,587	0,5204
I Moran do resíduo	0,5379*	0,3521*	-0,0811*	0,2181*
Crit. informação Akaike	971,225	878,462	860,692	905,916
Crit. Schwarz	983,911	886,919	877,606	918,601

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%.

APÊNDICE C – RESULTADOS DAS ESTIMAÇÕES PARA OS MODELOS SAR, SEM, SDM E SLX PARA A CONVERGÊNCIA CONDICIONAL

Variáveis/Testes	Modelos			
	SAR	SEM	SDM	SLX
Constante	2,7236*	2,7518*	4,8511	2,7270*
X1	-0,8637*	-0,8702*	-0,9032*	-0,8993*
X2	0,0108	-0,0024	-0,0100	0,0097
X3	0,0008	0,0027	0,0061	0,0017
X4	0,0110	0,0133***	0,0255**	0,0093
X5	-0,0246	-0,0115	-0,0756	-0,0026
X6	0,0114	0,0050	0,0174	0,0034
X7	0,0195	0,0197	0,0295	0,0145
X8	0,0235	0,0207	-0,0037	0,0212
X9	0,0190	0,0191	0,0178	0,0208
X10	-0,0262**	-0,0277**	-0,0410**	-0,0296**
X11	0,0268*	0,0186*	0,0231*	0,0171*
X12	0,0216*	0,0200*	0,0229*	0,0134**
X13	-0,6322**	-0,4949***	-2,500	-0,4152
X14	0,2144	0,2692	0,3405	0,1892
X15	-0,0044	0,0312	0,0557	0,0541
X16	0,2691**	0,3412**	0,5658**	0,72407**
X17	0,0640	0,1232	0,5172	-0,0068
WX1	-	-	-0,5124	-0,0800
WX2	-	-	0,3063**	0,0859*
WX3	-	-	-0,0687	-0,0180
WX4	-	-	0,0221	-0,0264
WX5	-	-	-0,0778	-0,0545
WX6	-	-	0,0858*	0,0595*
WX7	-	-	0,1121	0,0222
WX8	-	-	0,0420	0,0195
WX9	-	-	-0,0644***	-0,0090
WX10	-	-	0,1037	0,0153
WX11	-	-	0,0034	0,0179
WX12	-	-	-0,0039	0,0083
WX13	-	-	4,6248	-0,4983
λ	-	0,3252*	-	-
ρ	-0,0497	-	-0,2349	-
Pseudo R ²	0,6092	0,6099	0,5162	0,6545
Crit. informação Akaike	822,628	801,942	789,331	800,084
Crit. Schwarz	902,970	878,055	924,644	931,0168
I Moran do resíduo	0,1475*	0,1593*	0,0187*	0,1166*

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%.

APÊNDICE D – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DA CONVERGÊNCIA ABSOLUTA POR REGIMES ESPACIAIS PARA O MODELO SAR

Variáveis	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	1,3945*	1,9508*	2,3778*	2,4237*	1,8141*
X1	-0,4301*	-0,6466*	-0,9016*	-0,6234*	-0,5064*
ρ global	-0,5713*				

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 901,905; Crit. Schwarz: 948,418. I de Moran dos resíduos: 0,3884 (p-valor 0,001).

APÊNDICE E – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DA CONVERGÊNCIA ABSOLUTA POR REGIMES ESPACIAIS PARA O MODELO SEM

Variáveis	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	1,7461*	2,2669*	2,4460*	2,4550*	1,9121*
X1	-0,5070*	-0,7544*	-0,9005*	-0,6417*	-0,5618*
λ global			0,4394*		

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 854,180; Crit. Schwarz: 899,465. I de Moran dos resíduos: 0,2343 (p-valor 0,001).

APÊNDICE F – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DA CONVERGÊNCIA ABSOLUTA POR REGIMES ESPACIAIS PARA O MODELO SDM

Variáveis	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	0,0351	0,1720	1,8397*	0,5728	0,7556
X1	-0,5191*	-0,7505*	-0,9021*	-0,7744*	-0,6016*
WX1			0,4954*		
			0,6812*		
			0,2029		
			0,6304*		
			0,3790		
ρ global	0,6249***				

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 839,223; Crit. Schwarz: 906,880. I de Moran dos resíduos: -0,1244 (p-valor 0,001).

APÊNDICE G – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DA CONVERGÊNCIA ABSOLUTA POR REGIMES ESPACIAIS PARA O MODELO SLX

Variáveis	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	0,3608	0,4430	2,5168*	1,4230*	1,2610*
X1	-0,4750*	-0,7171*	-0,9048*	-0,7242*	-0,5626*
WX1	0,3334	0,5573*	-0,0339	0,3614*	0,2068**

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 864,622; Crit. Schwarz: 928,049. I de Moran dos resíduos: 0,1584 (p-valor 0,001).

APÊNDICE H – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DA CONVERGÊNCIA CONDICIONAL POR REGIMES ESPACIAIS PARA O MODELO SAR

Variáveis	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	2,7658*	2,9039*	1,9646*	2,8825*	2,5714*
X1	-0,07468*	-0,8504*	-0,9466*	-0,8752*	-0,9457*
X2	0,1052**	-0,0155	-0,0502**	0,0696	0,0740*
X3	0,2043**	0,0012	0,0230***	-0,0180	-0,0126
X4	0,0270	-0,0048	0,0504*	0,0039	-0,0070
X5	-0,1098	-0,0224	-0,0393	-0,0058	0,0399
X6	-0,0321	0,0167	-0,0315**	0,0199	0,0176
X7	-0,2150*	0,0097	0,0368*	0,0991	0,0368*
X8	-0,1038	-0,0121	0,0815**	0,0597	0,1749*
X9	-0,0494	0,0301	0,0500*	-0,0786	-0,0372***
X10	-0,0719**	-0,0248	-0,0485**	-0,0385***	-0,0801
X11	0,0203	0,0144	-0,1127*	0,0233*	0,0360*
X12	0,0011	0,0416*	0,0378**	-0,0038	0,0050
X13	-1,0059	-0,0811	-0,4032	-0,0205	-0,296
p global	-0,0048				

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 806,643; Crit. Schwarz: 1102,529. I de Moran dos resíduos: 0,0850 (p-valor 0,004).

APÊNDICE I – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DA CONVERGÊNCIA CONDICIONAL POR REGIMES ESPACIAIS PARA O MODELO SEM

Variáveis	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	2,7583*	2,9714*	2,0684*	2,9009*	2,5648*
X1	-0,7458*	-0,8673*	-0,9546*	-0,8793*	-0,9431*
X2	0,1054**	-0,0299	-0,0516**	0,0677	0,0742*
X3	0,2022**	0,0084	0,0231	-0,0190	-0,0127
X4	0,0258	0,0044	0,0476**	0,0030	-0,0072
X5	-0,1062	-0,0200	-0,0311	-0,0007	0,0387
X6	-0,0287	0,0054	-0,0314***	0,0213	0,0176
X7	-0,2170*	0,0118	0,0421*	0,1008	0,0366*
X8	-0,1010	-0,0140	0,0782***	0,0516	0,1746*
X9	-0,0500	0,0346**	0,0391***	-0,0795	-0,0372***
X10	-0,0720**	-0,0265***	-0,0470***	-0,0392***	-0,0797
X11	0,0196	0,0114	-0,1102*	0,0217*	0,0364*
X12	0,0024	0,0399*	0,0406**	-0,0029	0,0051
X13	-0,9869	-0,1298	-0,3978	-0,0925	-0,2995
λ global			0,2473*		

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 791,424; Crit. Schwarz: 1087,420. I de Moran dos resíduos: 0,1125 (p-valor 0,001).

APÊNDICE J – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DA CONVERGÊNCIA CONDICIONAL POR REGIMES ESPACIAIS PARA O MODELO SDM

Variáveis	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	2,9087	2,1190***	3,0383***	2,2803	5,5487*
X1	-0,8110*	-0,9111*	-0,9022*	-0,8656*	-1,0639*
X2	0,1230*	-0,0221	-0,0930*	0,0564	0,0535
X3	0,1189	0,0062	0,0264**	-0,0094	-0,0533
X4	0,0431***	0,0001	0,0324	0,0011	-0,0052
X5	-0,2348***	-0,0021	0,0421	0,0001	-0,0515
X6	-0,0285	0,0058	-0,0413*	0,0194	-0,0064
X7	-0,0753	-0,0006	0,0319**	0,0241	0,0486*
X8	-0,0866	-0,0115	0,0455	0,0565	0,1444**
X9	-0,0494	0,0340	0,0688*	-0,0872***	0,0349
X10	-0,0026	-0,0328**	-0,0403	-0,0559**	-0,0818
X11	0,0286**	0,0103	-0,0578	0,0162**	0,0465**
X12	-0,083	0,0277**	0,0414**	-0,0046	0,0275
X13	0,1918	-0,7388	-0,0131	-0,2756	-0,3156
WX1			-0,2027 0,1131 0,2453 0,1089 -1,1273		
WX2	0,3341***	0,1157**	-0,1095	0,0902	0,1878**
WX3	0,2536***	-0,0479**	0,0282	0,0425	-0,0335
WX4	-0,1563*	-0,0610***	-0,0029	0,0252	-0,0907***
WX5	-0,0543	0,0130	-0,1863	-0,0886	-0,0908
WX6	0,0474	0,0774**	-0,0438	-0,0343	-0,0010
WX7	-0,5174***	0,0259	-0,0580	-0,0390	0,0045
WX8	-0,0909	0,0187	-0,0472	0,1345	0,5621***
WX9	-0,0252	-0,0287	0,1396**	0,0227	-0,0157
WX10	0,1666	0,0196	0,0795	0,0147	-0,1251
WX11	0,0186	-0,0119	0,1918	0,0339***	0,1339*
WX12	0,0935**	0,0169	0,0273	-0,0334	0,0189
WX13	-1,3275	0,1310	-2,2160**	0,8935	0,4385
p global	-0,0159				

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 792,276; Crit. Schwarz: 1067,353. I de Moran dos resíduos: 0,0773 (p-valor 0,002).

APÊNDICE K – RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DA CONVERGÊNCIA CONDICIONAL POR REGIMES ESPACIAIS PARA O MODELO SLX

Variáveis	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	2,8712	2,0872**	3,5072	2,2508**	2,7877*
X1	-0,8108*	-0,9116*	-0,9011*	-0,8664*	-0,9781*
X2	0,1225	-0,0225	-0,0985**	0,0564	0,1044*
X3	0,1186	0,0063	0,0272	-0,0095	-0,0191
X4	0,0433***	0,0004	0,0337	0,0011	-0,0203
X5	-0,2347	-0,0018	0,0367	0,0004	0,1005***
X6	-0,0289	0,0056	-0,0420***	0,0196	0,0065
X7	-0,0745	-0,0004	0,0291	0,0239	0,0317
X8	-0,0879	-0,0116	0,0448	0,0558	0,0814
X9	-0,0496	0,0340***	0,0682***	-0,0877	-0,0080
X10	-0,0029	-0,0327**	-0,0395	-0,0555**	-0,0175
X11	0,0287	0,0102	-0,0554	0,0161**	0,0303***
X12	-0,0084	0,0276**	0,0419	-0,0046	0,0077
X13	0,1992	-0,7434	-0,0565	-0,2832	-0,2205
WX1	-0,1917	0,1245	0,1068	0,1192	0,0061
WX2	0,3351	0,1156**	-0,1255	0,0872	0,0574
WX3	0,2530	-0,0474***	0,0292	0,0431	0,0021
WX4	-0,1567**	-0,0609**	-0,0009	0,0251	-0,0598
WX5	-0,0519	0,0128	-0,01775	-0,0886	-0,1968**
WX6	0,0465	0,0771*	-0,0439	-0,0343	0,0047
WX7	-0,5135***	0,0255	-0,0544	-0,0397	-0,1251***
WX8	-0,0917	0,0190	-0,0516	0,1337	0,1254
WX9	-0,0274	-0,0295	0,1612***	0,0265	-0,0389
WX10	0,1670	0,0202	0,0682	0,0146	0,0179
WX11	0,0184	-0,0120	0,1796	0,0333***	0,1042*
WX12	0,0929	0,0163	0,0375	-0,0329	0,0289
WX13	-1,3239	0,1548	-2,1691	0,8981	0,0651

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 794,707; Crit. Schwarz: 1365,556. I de Moran dos resíduos: 0,0554 (p-valor 0,026).

APÊNDICE L – RESULTADOS DO MODELO SDEM PARA A CONVERGÊNCIA ABSOLUTA POR REGIMES ESPACIAIS

Variáveis/ Testes	Centro-Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Constante	0,3645	0,6098	2,7373*	1,4899*	1,4443*
X1	-0,4689*	-0,7132*	-0,9139*	-0,7203*	-0,6089*
WX1	0,3307	0,4969*	-0,1234	0,3403*	0,1960**
λ global	0,3455**				

Fonte: elaborado pela autora com base nos resultados da pesquisa. Notas: * significativo a 1%; ** significativo a 5%; *** significativo a 10%. Crit. Informação Akaike: 835,796; Crit. Schwarz: 899,223. I de Moran dos resíduos: 0,1680 (p-valor 0,001).