Revista Brasileira de Estudos de Gestão e Desenvolvimento Regional
v. 10, n. 03, p. 70-96, 2026
Seção de Artigos

EXPANSÃO E INTENSIFICAÇÃO DAS LAVOURAS TEMPORÁRIAS DE SOJA, MILHO E ALGODÃO NO CENTRO-OESTE BRASILEIRO (1985–2020): ANÁLISE DE TENDÊNCIA E CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO APLICADOS A DADOS PÚBLICOS

EXPANSION AND INTENSIFICATION OF TEMPORARY CROPS—SOYBEAN, CORN, AND COTTON—IN THE BRAZILIAN CENTER-WEST (1985–2020): TREND ANALYSIS AND STATISTICAL PROCESS CONTROL APPLIED TO PUBLIC DATA

EXPANSIÓN E INTENSIFICACIÓN DE LOS CULTIVOS TEMPORALES DE SOJA, MAÍZ Y ALGODÓN EN EL CENTRO-OESTE BRASILEÑO (1985–2020): ANÁLISIS DE TENDENCIA Y CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS APLICADOS A DATOS PÚBLICOS

Reinaldo Mendonça Pereira
https://orcid.org/0009-0001-1324-2258
Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT
e-mail: mendoncareinaldo28@gmail.com

Submissão em: 05/09/2026 Aceito em: 14/10/2026

RESUMO
O Centro-Oeste brasileiro concentra a maior fronteira agrícola tropical do planeta, e o monitoramento confiável de sua dinâmica é condição para o planejamento territorial e para a validação de produtos de mapeamento de uso e cobertura do solo. Este trabalho analisou a expansão e a intensificação das lavouras temporárias de soja, milho e algodão em Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Distrito Federal entre 1985 e 2020, utilizando exclusivamente dados públicos: a série municipal completa da Produção Agrícola Municipal do IBGE, agregada a partir dos 467 municípios da região. Aplicaram-se o teste de tendência de Mann-Kendall e o estimador de declive de Sen, um índice de sucessão milho–soja como medida de dupla safra, e controle estatístico de processo com cartas de médias e amplitudes sobre o aproveitamento (razão entre área colhida e área plantada) e carta de individuais sobre a taxa de expansão anual da soja. A área colhida das três culturas passou de 4,04 para 27,06 milhões de hectares, um aumento de 6,7 vezes. A soja cresceu de 2,84 para 16,76 milhões de hectares (declive de Sen de 422,5 mil ha ano^{-1}), o milho de 1,05 para 9,08 milhões (184,1 mil ha ano^{-1}) e o algodão de 0,15 para 1,21 milhão (24,5 mil ha ano^{-1}); todas as tendências regionais foram significativas ($p < 0,001$). A participação da região no total nacional subiu de 28,0% para 45,1% na soja, de 8,9% para 49,8% no milho e de 6,5% para 74,1% no algodão. O índice de sucessão milho–soja passou de 0,37 para 0,54, com queda intermediária para 0,20 em 2005, evidenciando que a intensificação por dupla safra é fenômeno posterior a 2006 e responde por parcela crescente do crescimento da produção. O algodão sofreu reorganização espacial radical: Mato Grosso passou de 11,5% para 94,2% da área regional, enquanto Mato Grosso do Sul e Goiás recuaram 52,5% e 39,8% em área absoluta. As cartas de controle identificaram 1990, 2000 e 2016 como anos fora dos limites no

aproveitamento, associados a anomalias climáticas, e detectaram deslocamento sustentado de patamar a partir de 2014, com aproveitamento médio de 0,9974 no período 2012–2020; o índice de capacidade Cpk de 1,84 indica processo capaz frente a uma especificação de aproveitamento mínimo de 0,95. Conclui-se que a combinação de estatísticas públicas, análise de tendência não paramétrica e controle estatístico de processo constitui instrumento replicável de auditoria da dinâmica agrícola regional e base de referência independente para a validação de produtos de sensoriamento remoto.
Palavras-chave: Fronteira Agrícola, Dupla Safra, Mann-Kendall, Declive de Sen, Capacidade de Processo

ABSTRACT

The Brazilian Centre-West holds the largest tropical agricultural frontier in the world, and reliable monitoring of its dynamics is a precondition for territorial planning and for the validation of land use and land cover products. This study analysed the expansion and intensification of temporary crops of soybean, maize and cotton in Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás and the Federal District between 1985 and 2020, using exclusively public data: the complete municipal series of the Brazilian Municipal Agricultural Production survey (IBGE), aggregated from the 467 municipalities of the region. We applied the Mann-Kendall trend test and Sen's slope estimator, a maize-to-soybean succession index as a measure of double cropping, and statistical process control mean and range charts for the harvest ratio (harvested area divided by planted area) and an individual's chart for the annual soybean expansion rate. The harvested area of the three crops rose from 4.04 to 27.06 million hectares, a 6.7-fold increase. Soybean grew from 2.84 to 16.76 million hectares (Sen's slope of 422.5 thousand ha yr^{-1}), maize from 1.05 to 9.08 million (184.1 thousand ha yr^{-1}) and cotton from 0.15 to 1.21 million (24.5 thousand ha yr^{-1}); all regional trends were significant ($p < 0.001$). The region's share of the national total rose from 28.0% to 45.1% for soybean, from 8.9% to 49.8% for maize and from 6.5% to 74.1% for cotton. The maize-to-soybean succession index rose from 0.37 to 0.54, with an intermediate low of 0.20 in 2005, showing that double-cropping intensification is a post-2006 phenomenon accounting for a growing share of output growth. Cotton underwent a radical spatial reorganisation: Mato Grosso rose from 11.5% to 94.2% of the regional area, while Mato Grosso do Sul and Goiás declined by 52.5% and 39.8% in absolute area. Control charts flagged 1990, 2000 and 2016 as out-of-control years for the harvest ratio, associated with climatic anomalies, and detected a sustained level shift from 2014 onwards, with a mean harvest ratio of 0.9974 over 2012–2020; a capability index Cpk of 1.84 indicates a capable process against a minimum harvest ratio specification of 0.95. We conclude that combining public statistics, non-parametric trend analysis and statistical process control provides a replicable instrument for auditing regional agricultural dynamics and an independent reference baseline for validating remote sensing products.
Keywords: Agricultural Frontier, Double Cropping, Mann-Kendall, Sen's Slope, Process Capability

RESUMEN

La región Centro-Oeste de Brasil concentra la mayor frontera agrícola tropical del planeta, y el monitoreo fiable de su dinámica es una condición necesaria para la planificación territorial y la validación de productos de mapeo de uso y cobertura del

suelo. Este trabajo analizó la expansión y la intensificación de los cultivos temporales de soja, maíz y algodón en Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás y el Distrito Federal entre 1985 y 2020, utilizando exclusivamente datos públicos: la serie municipal completa de la Producción Agrícola Municipal del IBGE, agregada a partir de los 467 municipios de la región. Se aplicaron la prueba de tendencia de Mann-Kendall y el estimador de pendiente de Sen, un índice de sucesión maíz-soja como medida de doble cultivo, así como el control estadístico de procesos mediante gráficos de medias y rangos para el aprovechamiento (relación entre área cosechada y área plantada) y gráficos de valores individuales para la tasa de expansión anual de la soja. El área cosechada de los tres cultivos pasó de 4,04 a 27,06 millones de hectáreas, un aumento de 6,7 veces. La soja creció de 2,84 a 16,76 millones de hectáreas (pendiente de Sen de 422,5 mil ha año^{-1}), el maíz de 1,05 a 9,08 millones (184,1 mil ha año^{-1}) y el algodón de 0,15 a 1,21 millones (24,5 mil ha año^{-1}); todas las tendencias regionales fueron significativas ($p < 0,001$). La participación de la región en el total nacional aumentó del 28,0 % al 45,1 % en la soja, del 8,9 % al 49,8 % en el maíz y del 6,5 % al 74,1 % en el algodón. El índice de sucesión maíz-soja pasó de 0,37 a 0,54, con una caída intermedia a 0,20 en 2005, lo que evidencia que la intensificación mediante el doble cultivo es un fenómeno posterior a 2006 y representa una parte creciente del aumento de la producción. El algodón experimentó una reorganización espacial radical: Mato Grosso pasó del 11,5 % al 94,2 % de la superficie regional, mientras que Mato Grosso do Sul y Goiás retrocedieron un 52,5 % y un 39,8 % en superficie absoluta. Las cartas de control identificaron los años 1990, 2000 y 2016 como valores atípicos en el aprovechamiento, asociados a anomalías climáticas, y detectaron un cambio de nivel sostenido a partir de 2014, con un aprovechamiento medio de 0,9974 en el periodo 2012–2020; el índice de capacidad Cpk de 1,84 indica un proceso capaz frente a una especificación de aprovechamiento mínimo de 0,95. Se concluye que la combinación de estadísticas públicas, análisis de tendencias no paramétricas y control estadístico de procesos constituye un instrumento replicable para auditar la dinámica agrícola regional y una base de referencia independiente para la validación de productos de teledetección.
Palabras clave: Frontera Agrícola, Doble Cosecha, Mann-Kendall, Pendiente de Sen, Capacidad del Proceso

1 INTRODUÇÃO

A conversão de ecossistemas nativos em áreas agrícolas é um dos principais vetores de mudança ambiental global, com efeitos diretos sobre estoques de carbono, regulação hídrica, biodiversidade e segurança alimentar (Lambin; Meyfroidt, 2011). No Brasil, esse processo concentrou-se no Cerrado, reconhecido como *hotspot* mundial de biodiversidade, que perdeu cerca de metade de sua cobertura original e permanece sob proteção legal menos restritiva do que a Amazônia (Klink; Machado, 2005; Strassburg *et al*., 2017). A Coleção 11 do MapBiomas indica que a cobertura de vegetação nativa do território nacional recuou de 79% para 65% entre 1985 e 2025, e que a agropecuária passou de 18% para 32% do território; proporcionalmente, as formações savânicas foram as mais afetadas, com perda de 30% de sua área, e Mato Grosso viu sua vegetação nativa cair de 90% para 61% do território estadual (Projeto MapBiomas, 2026).

O Centro-Oeste é o epicentro desse processo. A região reúne condições que a tornaram singular na agricultura tropical: extensas superfícies aplainadas sobre

chapadas, solos profundos e bem drenados, e um regime pluviométrico com estação chuvosa longa o bastante para acomodar dois ciclos comerciais sucessivos (Arvor *et al.*, 2014; Spera *et al*., 2016). A consolidação da dupla safra a partir de meados dos anos 2000 alterou qualitativamente a natureza do crescimento agrícola: a produção passou a crescer não apenas pela incorporação de novas terras, mas pelo aumento do número de ciclos por unidade de área e por ano (Spera *et al*., 2014; Arvor *et al.*, 2012). Esse mecanismo já foi documentado para Mato Grosso a partir de imagens orbitais (Spera *et al*., 2014; Arvor *et al.*, 2011) e para o país como um todo por meio de amostragem estatística do acervo Landsat (Zalles *et al*., 2019).

A distinção entre esses dois componentes do crescimento, expansão horizontal e intensificação temporal não é um detalhe metodológico. Ela condiciona diretamente a comparabilidade entre produtos de sensoriamento remoto e estatísticas agrícolas oficiais. Um mapa de uso e cobertura do solo registra a área física ocupada por lavouras em um dado ano; um censo agrícola registra a área colhida, que soma os ciclos sucessivos praticados sobre a mesma área. Em regiões de dupla safra consolidada a diferença entre as duas grandezas pode superar 50%, e discrepâncias dessa magnitude são frequentemente atribuídas a erros de classificação quando decorrem, na verdade, de uma incompatibilidade conceitual entre as medidas (Arvor *et al.*, 2012; Song *et al*., 2021). Qualquer esforço de validação de produtos de mapeamento contra estatísticas oficiais precisa, portanto, representar explicitamente a frequência de cultivo.

A escolha da fonte de dados condiciona o que se pode observar. Produtos de sensoriamento remoto de resolução moderada oferecem cobertura espacialmente explícita e permitem localizar a conversão, mas sua série útil raramente ultrapassa quatro décadas e a discriminação entre culturas anuais depende de assinaturas fenológicas que exigem densidade temporal de observações nem sempre disponível em regiões tropicais nebulosas (Bégué *et al*., 2018; Picoli *et al*., 2018). Levantamentos estatísticos oficiais, por outro lado, cobrem períodos mais longos, têm periodicidade regular e granularidade municipal, e registram diretamente as culturas praticadas, mas não informam onde, dentro do município, a lavoura se localiza, nem distinguem área física de área colhida. As duas fontes respondem, portanto, a perguntas diferentes, e a articulação entre elas depende de um tratamento explícito da frequência de cultivo.

Há ainda uma segunda lacuna, de natureza distinta. Séries históricas longas de indicadores territoriais sejam elas derivadas de sensoriamento remoto ou de levantamentos estatísticos são rotineiramente avaliadas quanto à sua acurácia em um dado ano, mas raramente quanto à sua consistência temporal. Os instrumentos consagrados de avaliação (matriz de confusão, acurácias do produtor e do usuário, estimadores de área ajustados pelo erro) foram concebidos para produtos estáticos e não oferecem critério objetivo para julgar se a oscilação interanual de um indicador reflete variação aleatória ou uma alteração real do processo subjacente (Olofsson *et al*., 2014). Sem esse critério, a interpretação das oscilações permanece subjetiva.

O controle estatístico de processo (CEP), formulado por Shewhart (1931) e sistematizado por Montgomery (2019), oferece arcabouço adequado a esse problema. Sua premissa é a distinção entre causas comuns, inerentes ao processo e responsáveis por variação previsível dentro de limites calculados a partir da própria variabilidade observada, e causas especiais, que produzem sinais estatisticamente improváveis e demandam investigação. Transposto ao monitoramento agrícola, o CEP permite tratar a série anual como um processo sob acompanhamento, no qual indicadores de

qualidade são monitorados por cartas de controle e avaliados por índices de capacidade. Embora consagrada em manufatura e em monitoramento ambiental, a abordagem raramente foi aplicada a séries de estatística agrícola ou de uso da terra.

Um terceiro elemento completa o quadro. O crescimento da produção agrícola pode decorrer de três mecanismos distintos e simultâneos: a incorporação de novas áreas, o aumento do número de safras por área e por ano, e o aumento do rendimento por hectare em cada safra. Cada um deles tem implicações ambientais radicalmente diferentes apenas o primeiro implica necessariamente conversão de coberturas anteriores e cada um responde a determinantes distintos, sejam eles fundiários, climáticos ou tecnológicos. A separação quantitativa dessas três vias é, portanto, condição para qualquer avaliação consistente da sustentabilidade da trajetória agrícola regional, e é viável a partir das estatísticas oficiais desde que área colhida, frequência de cultivo e rendimento sejam tratados como dimensões independentes.

Diante desse contexto, este trabalho tem três objetivos: (i) quantificar, com dados exclusivamente públicos, a trajetória de expansão da soja, do milho e do algodão no Centro-Oeste brasileiro entre 1985 e 2020, discriminando a contribuição de cada unidade da federação; (ii) medir a intensificação por sucessão de culturas e a reorganização espacial das lavouras ao longo do período; e (iii) demonstrar o uso de cartas de controle e de índices de capacidade como instrumento de auditoria da consistência temporal da série. A hipótese central é que a expansão horizontal e a intensificação temporal seguem temporalidades distintas, e que o CEP é capaz de identificar objetivamente os anos e os subconjuntos territoriais em que a série se afasta de seu comportamento esperado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

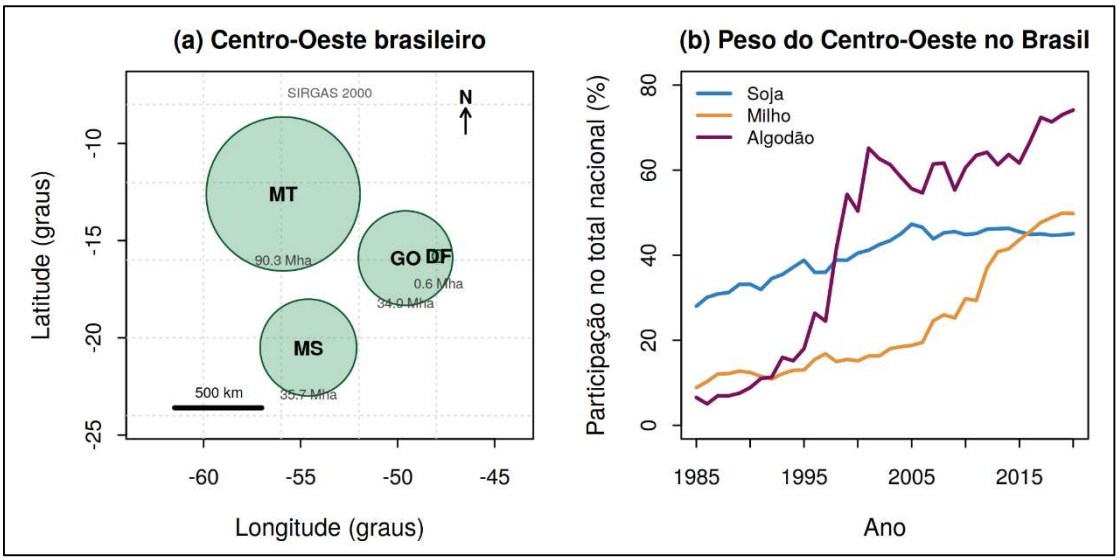
A área de estudo é a Região Centro-Oeste do Brasil, formada por Mato Grosso (90,32 Mha), Mato Grosso do Sul (35,71 Mha), Goiás (34,01 Mha) e Distrito Federal (0,58 Mha), totalizando 160,62 Mha e 467 municípios (Figura 1a). A região abrange integralmente o núcleo do bioma Cerrado e porções da Amazônia meridional, ao norte de Mato Grosso, e do Pantanal, a oeste. O relevo é dominado por chapadas e superfícies aplainadas em altitudes entre 300 e 1.000 m, com predomínio de Latossolos profundos e bem drenados, cuja correção química viabilizou a agricultura mecanizada a partir da década de 1970.

O clima é predominantemente do tipo Aw na classificação de Köppen (Alvares *et al*., 2013), tropical com estação seca de inverno bem definida e precipitação anual entre 1.200 e 2.000 mm, concentrada de outubro a abril. A duração da estação chuvosa é o fator limitante da dupla safra: onde ela se estende por mais de sete meses, torna-se viável semear o milho ou o algodão imediatamente após a colheita da soja, prática que se difundiu de forma desigual pela região e que constitui um dos objetos centrais desta análise (Arvor *et al*., 2014; Spera *et al*., 2016).

A ocupação agrícola da região seguiu um gradiente espacial e temporal bem documentado. O sul de Goiás e o sul de Mato Grosso do Sul foram incorporados primeiro, ainda nas décadas de 1970 e 1980, aproveitando a proximidade com os centros consumidores e a infraestrutura logística do Sudeste. As chapadas do médio-norte de Mato Grosso em Parecis, Sorriso, Sapezal foram ocupadas a partir da

segunda metade dos anos 1980 e ao longo dos anos 1990, com custos logísticos muito superiores compensados por escala, topografia favorável e preço da terra. Essa cronologia diferenciada é essencial para a interpretação dos resultados: unidades da federação de ocupação mais antiga tendem a apresentar taxas de expansão menores e maior estabilidade, ao passo que Mato Grosso concentra tanto a expansão quanto a variabilidade do período analisado.

Figura 1. Área de estudo e importância nacional



Nota: (a) Croqui de localização das quatro unidades da federação do Centro-Oeste, com círculos proporcionais à área territorial (IBGE, Áreas Territoriais, 2023); (b) participação da região no total nacional da área colhida de soja, milho e algodão entre 1985 e 2020, calculada a partir da Produção Agrícola Municipal (IBGE).

2.2 Base de dados

A fonte primária foi a Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE, tabela 1612 do sistema SIDRA, que reúne área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias em nível municipal desde 1974. Foram extraídos os registros de área colhida e de área plantada para os produtos soja (em grão), milho (em grão) e algodão herbáceo (em caroço), referentes aos 467 municípios de MT, MS, GO e DF no período de 1985 a 2020, e agregados por unidade da federação e por ano, resultando em 432 observações município-ano por cultura no nível estadual. Os totais nacionais das mesmas culturas foram extraídos em paralelo, para o cálculo da participação relativa da região.

A consistência da extração foi verificada por confronto com valores publicados de forma independente. Para 2020, a área colhida de soja no Brasil totalizou 37,19 Mha, a de milho 18,25 Mha e a de algodão herbáceo 1,63 Mha; a área de soja de Mato Grosso totalizou 9,99 Mha. Todos esses valores são compatíveis com os divulgados pelo IBGE e pela CONAB para a mesma safra (IBGE, 2026; CONAB, 2026). A variável área plantada só está disponível de forma completa para as quatro unidades a partir de 1988, o que restringe as análises de aproveitamento ao período 1988–2020. As demais bases utilizadas estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Bases de dados públicas utilizadas, nível de agregação, período de cobertura e finalidade no estudo

Base de dados	Fonte / agregação	Período	Finalidade
PAM — tabela 1612	IBGE/SIDRA; municipal	1985–2020	Área colhida e área plantada de soja, milho e algodão; série primária de análise
PAM — totais nacionais	IBGE/SIDRA; Brasil	1985–2020	Cálculo da participação relativa do Centro-Oeste
Áreas Territoriais	IBGE; estadual	2023	Normalização e caracterização da área de estudo
Boletins de safra de grãos	CONAB; estadual	2000–2026	Verificação independente e contextualização produtiva
MapBiomas Coleção 11	MapBiomas; 30 m	1985–2025	Contextualização da dinâmica de vegetação nativa e pastagem
Normais Climatológicas	INMET; estação	1991–2020	Caracterização climática da região

Nota: todas as bases são de acesso livre e gratuito. Endereços de download e datas de acesso constam da seção de Disponibilidade de Dados.

2.3 Indicadores derivados

Três indicadores foram construídos a partir da série primária. O primeiro é o índice de sucessão milho–soja, definido como a razão entre a área colhida de milho e a área colhida de soja em cada unidade e ano. No Centro-Oeste, a soja é cultivada essencialmente na primeira safra e a quase totalidade do milho passou a ser semeada em sucessão a ela a partir do final da década de 2000; a razão entre as duas áreas constitui, portanto, uma medida direta e verificável da adoção da dupla safra, sem depender de estimativas de área física obtidas por sensoriamento remoto.

O segundo é o aproveitamento, definido como a razão entre a área colhida e a área plantada das três culturas somadas. Trata-se de uma característica de qualidade no sentido estrito do controle de processo: seu valor esperado é próximo da unidade, seus desvios para baixo medem perdas de safra por estiagem, excesso hídrico ou fitossanidade, e existe uma especificação técnica natural um aproveitamento mínimo aceitável contra a qual a capacidade do processo pode ser avaliada. O terceiro é a participação relativa da região no total nacional de cada cultura, empregado para dimensionar a concentração produtiva.

Construiu-se ainda a produtividade média, definida como a razão entre a quantidade produzida e a área colhida de cada cultura, unidade e ano, extraída da mesma tabela 1612. A partir dela, o crescimento da produção entre os anos extremos da série foi decomposto logaritmicamente em duas parcelas, uma atribuível à expansão da área colhida e outra ao ganho de rendimento, segundo

$$\ln(P_{2020}/P_{1985}) = \ln(A_{2020}/A_{1985}) + \ln(R_{2020}/R_{1985}), \qquad (1)$$

em que P é a produção, A a área colhida e R a produtividade. A contribuição relativa de cada fator corresponde à razão entre o respectivo termo e o total, expressa

em percentagem. A decomposição logarítmica é preferível à decomposição aritmética por ser exata e aditiva, sem termo de interação residual.

2.4 Análise de tendência

A significância das tendências das séries anuais foi avaliada pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), escolhido por não exigir normalidade nem linearidade e por sua robustez a valores atípicos. A estatística S é calculada como a soma dos sinais das diferenças entre todos os pares de observações, sua variância é corrigida para empates, e a estatística padronizada Z é comparada à distribuição normal. A magnitude das tendências foi estimada pelo declive de Sen (1968), definido como a mediana dos declives entre todos os pares de observações, também robusto a valores extremos. Adotou-se nível de significância de 5%. As análises foram conduzidas para o agregado regional e separadamente para cada unidade da federação, e complementadas pelo cálculo das taxas médias de expansão em quatro subperíodos decenais.

2.5 Controle estatístico do processo

Duas cartas de controle foram construídas. A primeira monitora o aproveitamento e adota o ano como subgrupo racional, formado pelas quatro unidades da federação ($n = 4$). Aplicaram-se cartas de médias e de amplitudes, com limites dados por $\bar{\bar{X}} \pm A_2\bar{R}$ para as médias e por $D_3\bar{R}$ e $D_4\bar{R}$ para as amplitudes, com as constantes $A_2 = 0{,}729$, $D_3 = 0$, $D_4 = 2{,}282$ e $d_2 = 2{,}059$, apropriadas a subgrupos de quatro elementos. A leitura conjunta das duas cartas permite distinguir perturbações sistêmicas, que afetam simultaneamente todas as unidades e deslocam a média sem alterar a amplitude, de perturbações localizadas, que ampliam a dispersão entre unidades.

A segunda carta monitora a taxa de variação anual da área de soja do Centro-Oeste. Por se tratar de uma única observação por ano, empregou-se a carta de individuais e amplitude móvel, com desvio-padrão estimado por $\hat{\sigma} = \bar{MR}/d_2$ e $d_2 = 1{,}128$. A detecção de causas especiais utilizou quatro das regras de Nelson (1984): um ponto além de três desvios-padrão da linha central; dois de três pontos consecutivos além de dois desvios-padrão do mesmo lado; quatro de cinco pontos consecutivos além de um desvio-padrão do mesmo lado; e oito pontos consecutivos do mesmo lado da linha central.

A capacidade do processo foi avaliada para o aproveitamento por meio do índice unilateral inferior $C_{pk} = (\bar{\bar{X}} - LIE)/(3\hat{\sigma})$, adotando-se como limite inferior de especificação um aproveitamento de 0,95, isto é, uma perda máxima admissível de 5% da área plantada. Valores de C_{pk} superiores a 1,33 indicam processo capaz de atender à especificação com margem confortável.

2.6 Ambiente computacional e reprodutibilidade

Toda a análise estatística, bem como a produção de gráficos e tabelas, foi realizada em R 4.3 (R. Core Team, 2024), utilizando implementações em R base das rotinas de Mann-Kendall, declive de Sen, cartas de controle e regras de Nelson, de modo a eliminar dependências externas e maximizar a reprodutibilidade. As implementações são funcionalmente equivalentes às dos pacotes trend, Kendall e qcc

(Scrucca, 2004). As figuras foram exportadas a 300 dpi. Composições cartográficas complementares podem ser produzidas em QGIS 3.34 LTR (QGIS Development Team, 2024) a partir da Malha Municipal do IBGE. Os códigos-fonte, a base extraída e as tabelas de resultados acompanham o artigo como material suplementar.

3 RESULTADOS

3.1 Expansão das três culturas

Entre 1985 e 2020, a área colhida das três culturas no Centro-Oeste passou de 4,04 para 27,06 milhões de hectares, um aumento de 6,7 vezes (Figura 2a; Tabela 2). A soja cresceu de 2,84 para 16,76 Mha (+489%), o milho de 1,05 para 9,08 Mha (+768%) e o algodão de 0,15 para 1,21 Mha (+721%). A trajetória da soja apresenta duas inflexões nítidas: uma aceleração acentuada entre 1999 e 2005, seguida de retração entre 2005 e 2007 que corresponde à crise de rentabilidade da soja no período, e a retomada sustentada a partir de 2008.

O crescimento não foi homogêneo entre as unidades da federação (Figuras 2b–2d). Mato Grosso concentrou a maior parte da expansão em todas as três culturas, passando de 0,80 para 9,99 Mha de soja (+1.156%), de 0,24 para 5,32 Mha de milho (+2.090%) e de 0,02 para 1,14 Mha de algodão (+6.630%). Goiás e Mato Grosso do Sul apresentaram crescimento expressivo em soja e milho, porém em patamar inferior, ao passo que o Distrito Federal, dada sua reduzida extensão territorial, manteve participação marginal.

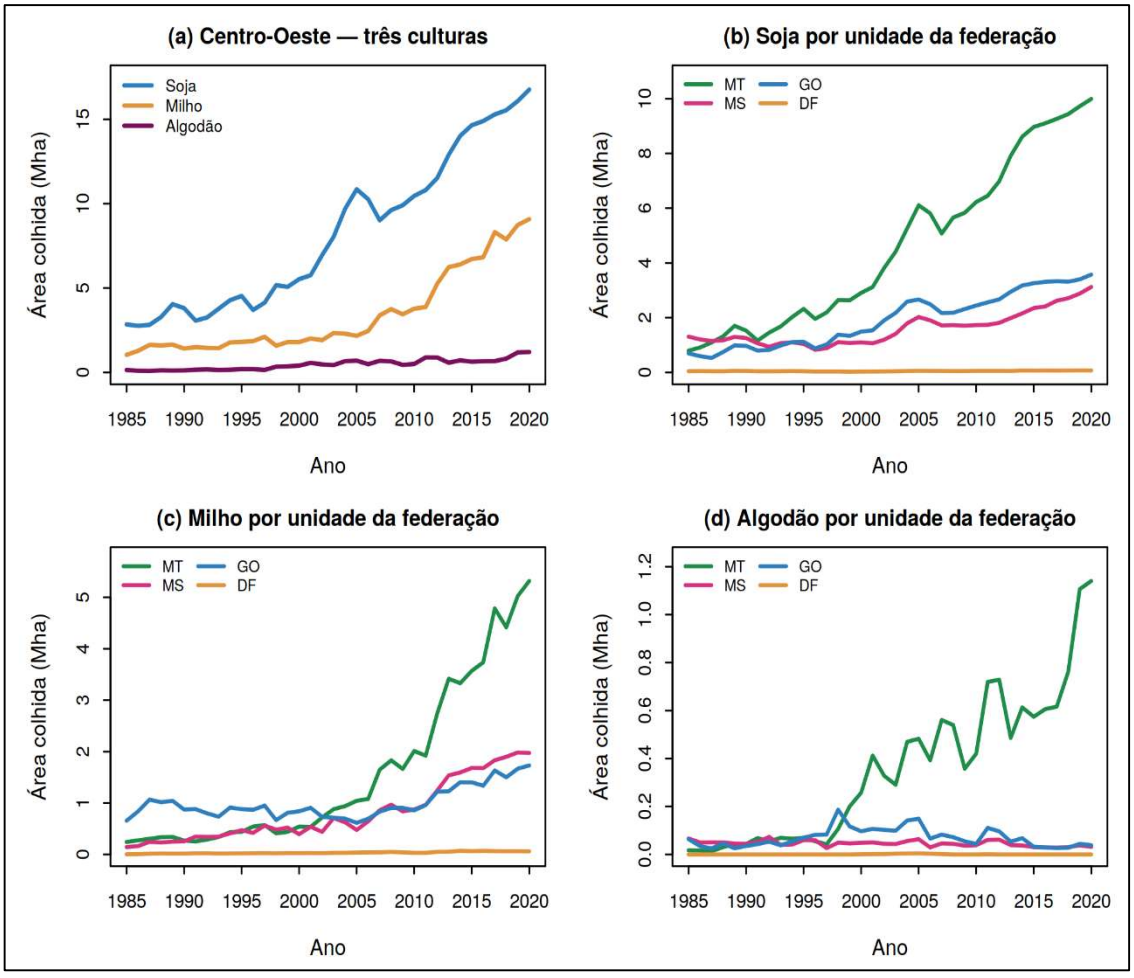
Tabela 2. Área colhida de soja, milho e algodão herbáceo por unidade da federação em anos selecionados, em mil hectares

Cultura	Unidade	1985	1995	2005	2015	2020	Δ 1985–2020 (%)
Soja	Mato Grosso	795,4	2.322,8	6.106,7	8.966,7	9.989,6	+1.156
	Mato Grosso do Sul	1.307,6	1.043,7	2.025,2	2.350,8	3.121,5	+139
	Goiás	695,9	1.121,5	2.663,4	3.260,0	3.574,2	+414
	Distrito Federal	45,3	43,8	59,0	68,9	74,5	+65
	Centro-Oeste	**2.844,2**	**4.531,9**	**10.854,2**	**14.646,4**	**16.759,9**	**+489**
Milho	Mato Grosso	242,9	439,4	1.043,8	3.570,6	5.318,8	+2.090
	Mato Grosso do Sul	143,2	472,2	476,5	1.681,7	1.973,0	+1.277
	Goiás	656,0	880,0	614,7	1.401,8	1.731,7	+164
	Distrito Federal	4,0	22,1	36,7	65,2	61,2	+1.430
	Centro-Oeste	**1.046,1**	**1.813,6**	**2.171,7**	**6.719,3**	**9.084,6**	**+768**
Algodão	Mato Grosso	16,9	69,4	482,4	574,1	1.140,4	+6.630
	Mato Grosso do Sul	66,6	60,0	63,7	30,7	31,7	−52
	Goiás	64,0	69,5	149,1	32,2	38,5	−40

Cultura	Unidade	1985	1995	2005	2015	2020	Δ 1985–2020 (%)
	Centro-Oeste	147,5	198,9	700,0	637,0	1.210,6	+721

Nota: o algodão do Distrito Federal apresenta área nula ou desprezível em quase toda a série e foi omitido. A base municipal desagregada acompanha o artigo como material suplementar.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Produção Agrícola Municipal (IBGE), tabela 1612.

Figura 2. Área colhida de soja, milho e algodão herbáceo no Centro-Oeste, 1985–2020



Nota: (a) Agregado regional para as três culturas; (b), (c) e (d) desagregação por unidade da federação para soja, milho e algodão respectivamente.
Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor (2026), Produção Agrícola Municipal (IBGE).

Cabe destacar o contraste entre as duas maiores unidades produtoras de soja no início da série. Em 1985, Mato Grosso do Sul era o maior produtor regional, com 1,31 Mha, contra 0,80 Mha de Mato Grosso. A posição inverteu-se já no início da década de 1990 e a distância ampliou-se de forma contínua: em 2020 Mato Grosso colhia 9,99 Mha contra 3,12 Mha de Mato Grosso do Sul, uma razão de 3,2 para 1. Mato Grosso do Sul, aliás, registrou retração absoluta de área de soja entre 1985 e 1995, período em que a cultura recuou de 1,31 para 1,04 Mha, o que explica seu τ comparativamente baixo (0,610) apesar da tendência positiva significativa no período completo.

3.2 Tendências e ritmo de expansão

O teste de Mann-Kendall confirmou tendência de crescimento monotônico altamente significativa para as três culturas no agregado regional (Tabela 3). A soja apresentou $\tau = 0{,}943$ ($p < 0{,}001$) e declive de Sen de 422,5 mil ha por ano; o milho, $\tau = 0{,}883$ ($p < 0{,}001$) e 184,1 mil ha por ano; o algodão, $\tau = 0{,}778$ ($p < 0{,}001$) e 24,5 mil ha por ano. Na desagregação por unidade da federação, todas as séries de soja e milho apresentaram tendência positiva significativa, com destaque para Mato Grosso, cujos declives de Sen é 277,7 mil ha por ano na soja e 184,1 mil ha por ano no milho respondem sozinhos pela maior parte do movimento regional.

O algodão constitui a exceção mais interessante. Enquanto Mato Grosso apresentou declive de Sen de 24,5 mil ha por ano ($\tau = 0{,}841$; $p < 0{,}001$), Mato Grosso do Sul registrou tendência negativa significativa ($\tau = -0{,}386$; $p = 0{,}001$; Sen de −575 ha por ano) e Goiás não apresentou tendência monotônica detectável ($\tau = 0{,}016$; $p = 0{,}902$), com queda de 39,8% em área absoluta. Trata-se, portanto, não de um crescimento regional uniforme, mas de uma realocação espacial da cultura.

Tabela 3. Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall e do estimador de declive de Sen para a área colhida, 1985–2020

Cultura	Unidade	τ de Kendall	Z	p	Declive de Sen (ha ano⁻¹)
Soja	Centro-Oeste	0,943	8,08	< 0,001	+422.526
	Mato Grosso	0,943	8,08	< 0,001	+277.677
	Mato Grosso do Sul	0,610	5,22	< 0,001	+49.806
	Goiás	0,889	7,61	< 0,001	+91.008
	Distrito Federal	0,463	3,96	< 0,001	+839
Milho	Centro-Oeste	0,883	7,56	< 0,001	+184.100
	Mato Grosso	0,914	7,83	< 0,001	+114.750
	Mato Grosso do Sul	0,902	7,72	< 0,001	+45.986
	Goiás	0,352	3,01	0,003	+16.881
	Distrito Federal	0,835	7,15	< 0,001	+1.605
Algodão	Centro-Oeste	0,778	6,66	< 0,001	+24.527
	Mato Grosso	0,841	7,21	< 0,001	+24.545
	Mato Grosso do Sul	−0,386	−3,30	0,001	−576
	Goiás	0,016	0,12	0,902	+43

Nota: τ próximo de 1 indica crescimento monotônico praticamente perfeito. Valores de p referem-se ao teste bilateral.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A decomposição por subperíodos (Figura 4a; Tabela 4) revela que o ritmo de expansão não apenas se manteve como se acelerou ao longo das quatro décadas, mas com composição interna cambiante. Entre 1985 e 1995 a expansão média foi de 250,7 mil ha por ano, majoritariamente de soja. Entre 1995 e 2005 saltou para 718,2 mil ha por ano, ainda dominada pela soja (632,2 mil ha por ano) e com contribuição crescente do algodão. Entre 2005 e 2015 o total atingiu 827,7 mil ha por ano, mas pela

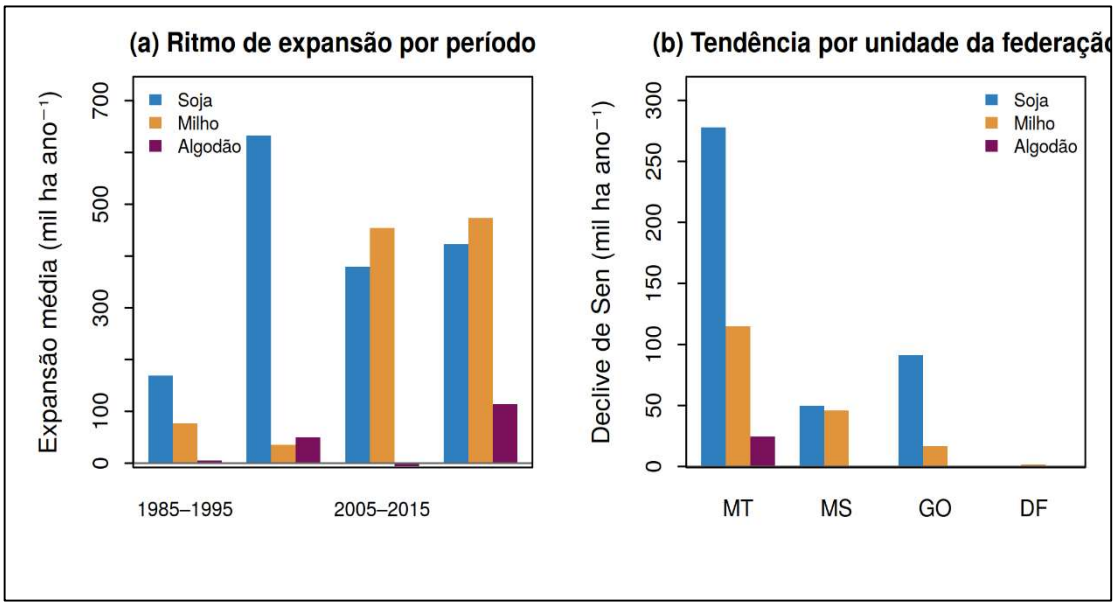
primeira vez o milho superou a soja (454,8 contra 379,2 mil ha por ano), enquanto o algodão apresentou contribuição negativa. No último subperíodo, de 2015 a 2020, a expansão média alcançou 1.010,5 mil ha por ano, com milho e soja em patamar semelhante e forte retomada do algodão (114,7 mil ha por ano).

Tabela 4. Expansão média anual da área colhida por subperíodo, em mil hectares por ano, Centro-Oeste

Subperíodo	Soja	Milho	Algodão	Total
1985–1995	+168,8	+76,8	+5,1	+250,7
1995–2005	+632,2	+35,8	+50,1	+718,2
2005–2015	+379,2	+454,8	−6,3	+827,7
2015–2020	+422,7	+473,1	+114,7	+1.010,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 4. Ritmo de expansão das lavouras temporárias



Nota: (a) Expansão média anual da área colhida por subperíodo e cultura; (b) declive de Sen estimado para cada cultura e unidade da federação no período completo. Valores negativos indicam retração da área colhida.

3.3 Intensificação por sucessão de culturas

O índice de sucessão milho–soja descreve uma trajetória em forma de U (Figura 3a). Em 1985 a razão era de 0,37, refletindo um milho ainda cultivado majoritariamente em primeira safra e uma soja em estágio inicial de expansão. Com a rápida incorporação de novas áreas de soja ao longo das décadas de 1990 e de 2000, o índice caiu continuamente até o mínimo de 0,20 em 2005: a expansão horizontal da soja superava largamente a do milho. A partir de 2006 o movimento se inverte, e o índice sobe de forma sustentada até 0,54 em 2020.

A inflexão de 2005–2006 é o marco temporal que separa dois regimes de crescimento. Antes dela, o aumento da produção regional decorria predominantemente da incorporação de novas terras; depois dela, uma parcela

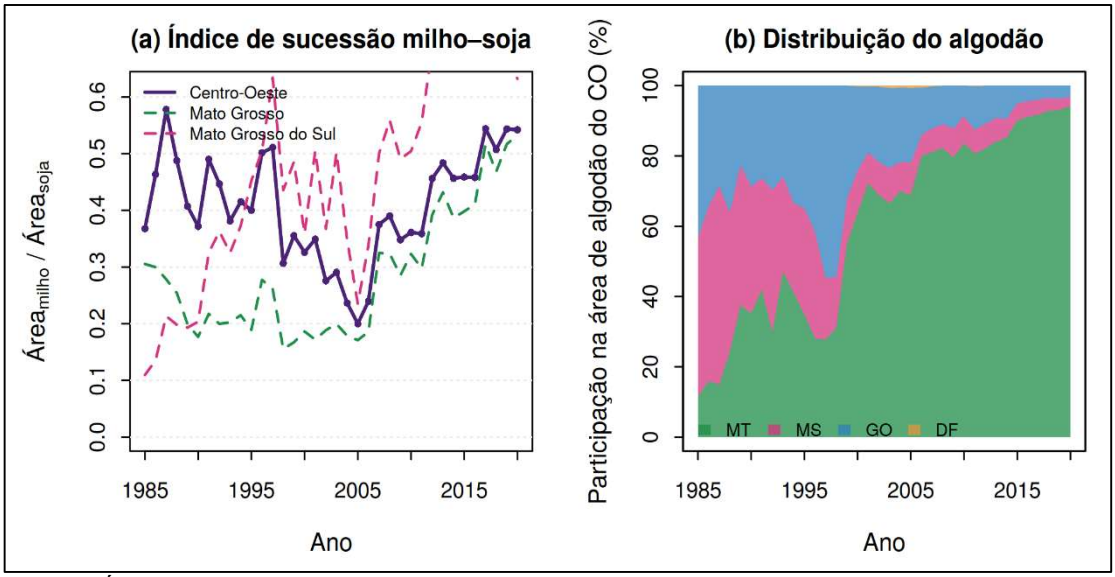
crescente passou a decorrer do aumento do número de ciclos por unidade de área. A desagregação por unidade da federação mostra que o processo é generalizado mas desigual: em 2020 o índice atingiu 0,63 em Mato Grosso do Sul, 0,53 em Mato Grosso e 0,48 em Goiás. O caso de Mato Grosso é particularmente expressivo, com o índice partindo de 0,31 em 1985 o mais baixo da região e alcançando 0,53 em 2020.

3.4 Reorganização espacial do algodão

A cultura do algodão sofreu a transformação espacial mais radical do período (Figura 3b). Em 1985 a área regional distribuía-se de forma relativamente equilibrada, com Mato Grosso do Sul respondendo por 45,2%, Goiás por 43,4% e Mato Grosso por apenas 11,5%. Em 2000 a participação de Mato Grosso já havia alcançado 63,8%, e em 2020 chegou a 94,2% de toda a área de algodão do Centro-Oeste. Em termos absolutos, Mato Grosso do Sul passou de 66,6 para 31,7 mil ha (−52,5%) e Goiás de 64,0 para 38,5 mil ha (−39,8%), enquanto Mato Grosso saltou de 16,9 para 1.140,4 mil ha.

Esse deslocamento não é um efeito de escala do crescimento regional, mas uma substituição efetiva: duas unidades produtoras perderam área absoluta enquanto uma terceira concentrou praticamente a totalidade da cultura. O movimento coincide temporalmente com a difusão do algodão de segunda safra semeado após a soja, sistema que exige janelas pluviométricas longas encontradas sobretudo nas chapadas mato-grossenses, e com a reorganização da cotonicultura brasileira em grandes unidades produtivas mecanizadas.

Figura 3. Intensificação e reorganização espacial



Nota: (a) Índice de sucessão milho–soja, definido como a razão entre a área colhida de milho e a de soja, para o Centro-Oeste e para Mato Grosso e Mato Grosso do Sul; (b) participação de cada unidade da federação na área colhida de algodão da região, 1985–2020.

3.5 Concentração produtiva nacional

A participação do Centro-Oeste no total nacional cresceu nas três culturas, mas com intensidades muito distintas (Figura 1b). Na soja, a participação passou de 28,0%

em 1985 para 45,1% em 2020 expansão relevante mas gradual, já que a região partia de posição consolidada. No milho, o salto foi de 8,9% para 49,8%: em 1985 o Centro-Oeste era produtor marginal e em 2020 respondia por metade da área colhida nacional, transformação que acompanha diretamente a difusão da segunda safra. No algodão, a participação saltou de 6,5% para 74,1%, o grau mais extremo de concentração regional entre as três culturas.

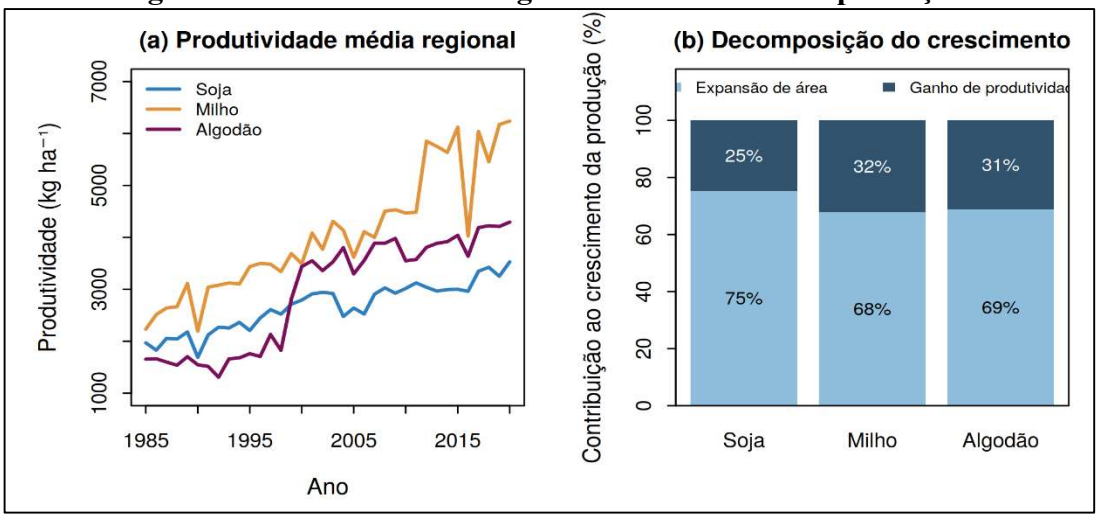
3.6 Produtividade e decomposição do crescimento da produção

A produtividade média regional cresceu de forma monotônica e significativa nas três culturas (Figura 7a). A soja passou de 1.970 para 3.528 kg ha^{-1} (τ = 0,806; $p < 0,001$; declive de Sen de 42,1 kg ha^{-1} por ano), o milho de 2.233 para 6.238 kg ha^{-1} (τ = 0,832; $p < 0,001$; 100,7 kg ha^{-1} por ano) e o algodão em caroço de 1.654 para 4.294 kg ha^{-1} (τ = 0,800; $p < 0,001$; 87,9 kg ha^{-1} por ano). Os ganhos foram, portanto, de 79% na soja, 179% no milho e 160% no algodão ao longo de 36 anos. Em 2020, a produtividade da soja era notavelmente homogênea entre as unidades da federação de 3.504 kg ha^{-1} em Mato Grosso do Sul a 3.592 kg ha^{-1} em Goiás, ao passo que o milho apresentava dispersão maior, de 5.422 kg ha^{-1} em Mato Grosso do Sul a 6.837 kg ha^{-1} em Goiás.

A combinação entre expansão de área e ganho de produtividade multiplicou a produção regional por fatores expressivos: a soja passou de 5,60 para 59,14 milhões de toneladas (×10,6), o milho de 2,34 para 56,67 milhões (×24,3) e o algodão em caroço de 0,24 para 5,20 milhões (×21,3). A decomposição logarítmica desse crescimento (Figura 7b) atribui 75,3% do aumento da produção de soja à expansão de área e 24,7% ao ganho de produtividade; para o milho, as parcelas são de 67,8% e 32,2%, e para o algodão de 68,8% e 31,2%.

Esse resultado qualifica de forma importante a leitura da intensificação. Embora o índice de sucessão evidencie a difusão da dupla safra, e embora a produtividade tenha crescido de forma robusta, a expansão da área colhida permaneceu o vetor dominante do crescimento da produção em todas as três culturas ao longo do período completo. A intensificação seja pela via da frequência de cultivo, seja pela via do rendimento por hectare foi importante, mas complementar, e não substitutiva, à incorporação de área.

Figura 7. Produtividade e origem do crescimento da produção.



Nota: (a) Produtividade média regional de soja, milho e algodão em caroço, 1985–2020; (b) decomposição logarítmica do crescimento da produção entre expansão de área colhida e ganho de produtividade, para o período completo.
Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor (2026), Produção Agrícola Municipal (IBGE).

Tabela 6. Produtividade média, produção total e decomposição do crescimento da produção no Centro-Oeste, 1985–2020

Cultura	Produtividade 1985 (kg ha⁻¹)	Produtividade 2020 (kg ha⁻¹)	Sen (kg ha⁻¹ ano⁻¹)	Produção 1985 (Mt)	Produção 2020 (Mt)	Contrib. área (%)	Contrib. produtividade (%)
Soja	1.970	3.528	+42,1	5,60	59,14	75,3	24,7
Milho	2.233	6.238	+100,7	2,34	56,67	67,8	32,2
Algodão em caroço	1.654	4.294	+87,9	0,24	5,20	68,8	31,2

Nota: todas as tendências de produtividade foram significativas ao nível de 0,1% no teste de Mann-Kendall. A decomposição é logarítmica, de modo que as contribuições de área e produtividade somam 100%.

Tabela 7. Produtividade média por unidade da federação em anos selecionados, em kg ha⁻¹

Cultura	Unidade da federação	1985	1995	2005	2015	2020
Soja	Mato Grosso	2.082	2.364	2.909	3.106	3.511
	Mato Grosso do Sul	1.957	2.188	1.836	3.108	3.504
	Goiás	1.865	1.914	2.622	2.640	3.592
	Distrito Federal	2.028	1.967	3.198	2.626	3.900
Milho	Mato Grosso	1.690	2.791	3.337	5.980	6.327
	Mato Grosso do Sul	2.285	3.040	2.711	5.785	5.422
	Goiás	2.426	3.951	4.645	6.786	6.837
	Distrito Federal	1.800	4.419	6.187	8.098	7.943
Algodão	Mato Grosso	1.289	1.260	3.489	4.012	4.292
	Mato Grosso do Sul	1.596	1.763	2.764	4.483	4.446
	Goiás	1.812	2.258	2.897	4.102	4.215

Nota: o algodão é expresso em caroço. A queda pontual da produtividade da soja em Mato Grosso do Sul em 2005 corresponde à seca que atingiu o sul da região naquela safra.
Fonte: Elaborado pelo autor (2026), Produção Agrícola Municipal (IBGE).

3.7 Auditoria da série por controle estatístico de processo

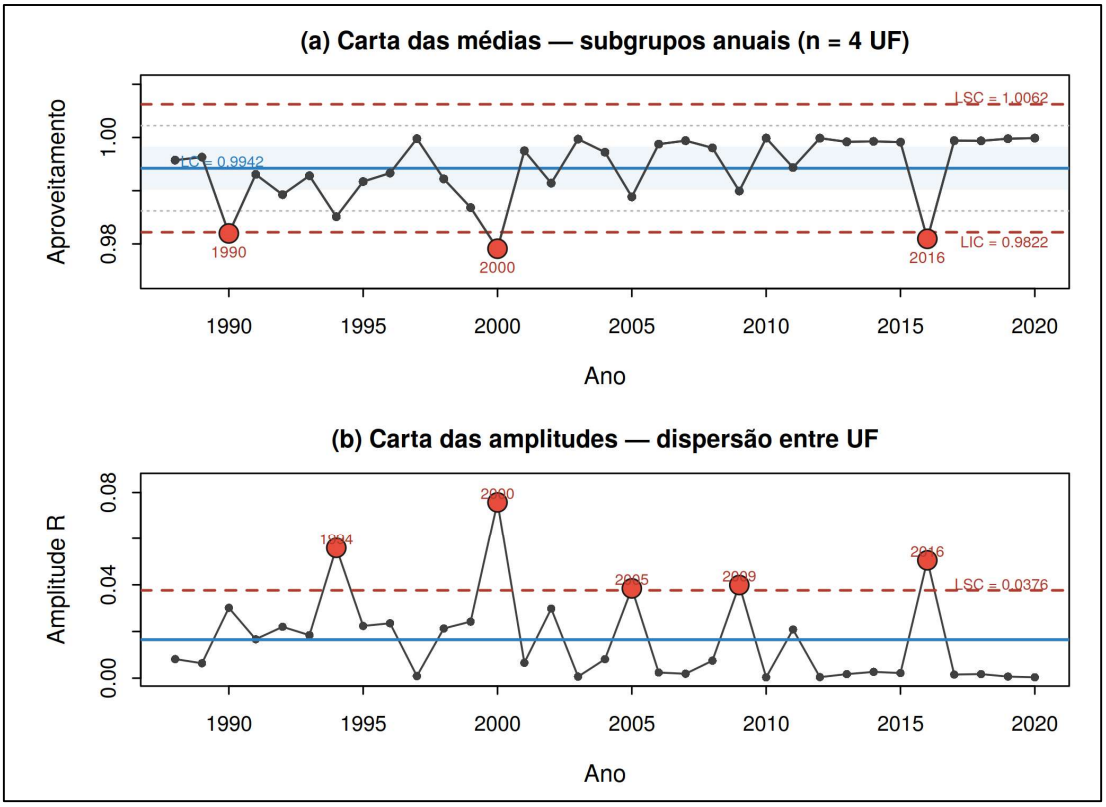
A carta de médias aplicada ao aproveitamento (Figura 5a) apresentou linha central de 0,9942, com limites de controle de 0,9822 e 1,0062. Três subgrupos anuais violaram a primeira regra de Nelson: 1990 (0,9820), 2000 (0,9791) e 2016 (0,9810). Os três correspondem a anos de anomalia climática documentada na região, e o de 2016 coincide com o forte evento El Niño de 2015/16. Na carta de amplitudes (Figura

5b), cinco anos excederam o limite superior de 0,0376 em 1994, 2000, 2005, 2009 e, indicando dispersão atípica entre as unidades da federação.

A leitura conjunta das duas cartas é informativa. Os anos de 2000 e 2016 aparecem simultaneamente nas duas, o que caracteriza perturbações severas e espacialmente heterogêneas: houve queda generalizada do aproveitamento e, ao mesmo tempo, forte diferenciação entre estados. Já 1990 aparece apenas na carta de médias, sinalizando uma perda de safra que atingiu as quatro unidades de forma relativamente uniforme. Inversamente, 1994, 2005 e 2009 aparecem somente na carta de amplitudes: nesses anos a média regional permaneceu sob controle, mas ao menos uma unidade divergiu marcadamente das demais.

As regras de sequência revelaram um sinal adicional de natureza distinta. A regra dos quatro pontos em cinco além de um desvio-padrão foi acionada continuamente de 2014 a 2020, indicando deslocamento sustentado do patamar do processo. O aproveitamento médio no período 2012–2020 foi de 0,9974, contra 0,9942 da série completa. Do ponto de vista do controle de processo trata-se de uma causa especial benéfica, atribuível a ganhos de manejo, melhoria do zoneamento agrícola de risco climático e adoção de cultivares mais adaptadas, e que recomenda o recálculo dos limites para o período recente.

Figura 5. Cartas de controle de médias e de amplitudes aplicadas ao aproveitamento (razão entre área colhida e área plantada das três culturas), com subgrupos racionais anuais formados pelas quatro unidades da federação (n = 4), 1988–2020

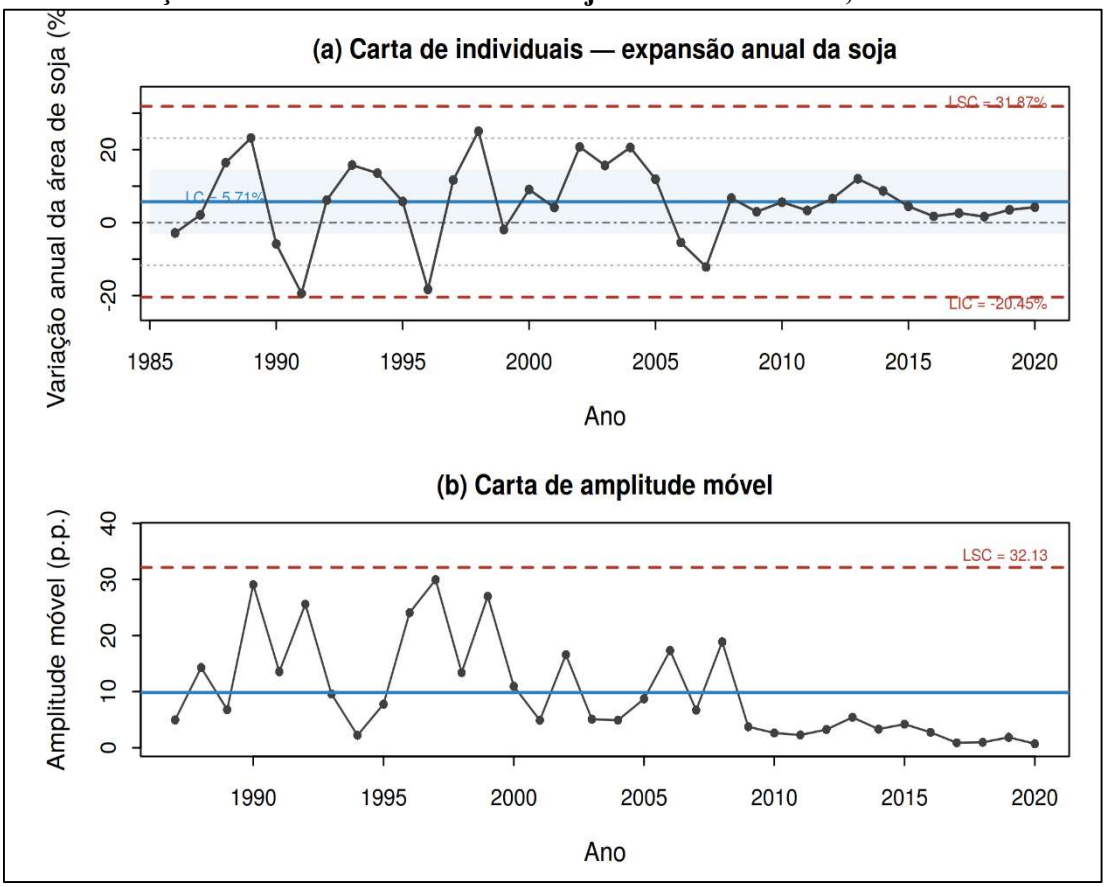


Nota: (a) Carta de médias, com linha central em 0,9942; (b) carta de amplitudes, com limite superior de controle em 0,0376. Pontos em vermelho indicam violações das regras de Nelson.

O índice de capacidade forneceu uma leitura complementar. Adotando-se o limite inferior de especificação de 0,95, obteve-se Cpk = 1,84, valor bem acima do patamar de 1,33 usualmente exigido. O processo é, portanto, não apenas estatisticamente estável como capaz: a variabilidade natural do aproveitamento é pequena o suficiente para que perdas superiores a 5% da área plantada sejam eventos raros no agregado regional. Vale notar que essa conclusão vale para o agregado das quatro unidades e das três culturas; a capacidade por cultura e por município seria necessariamente inferior, dada a maior variabilidade em escalas menores.

A carta de individuais aplicada à taxa de variação anual da área de soja (Figura 6) apresentou linha central de 5,71% ao ano e limites de controle de −20,45% e 31,87%. Nenhum ano violou as regras de Nelson ao longo dos 35 anos analisados. O crescimento máximo foi de 25,1% em 1998 e a maior retração de −19,4% em 1991, ambos dentro dos limites. Esse resultado tem interpretação substantiva: apesar da magnitude absoluta da expansão, sua taxa relativa manteve-se estatisticamente estável ao longo de três décadas e meia, comportando-se como um processo sob controle e não como uma sucessão de choques. A variabilidade interanual, ainda que elevada o desvio-padrão estimado é de 8,7 pontos percentuais, é uma característica intrínseca do processo, e não um conjunto de eventos excepcionais.

Figura 6. Carta de controle de individuais e amplitude móvel aplicada à taxa de variação anual da área colhida de soja no Centro-Oeste, 1986–2020



Nota: (a) Carta de individuais, com linha central em 5,71% ao ano e limites de controle a três desvios-padrão; (b) carta de amplitude móvel. Nenhum ponto violou as regras de Nelson.

3.8 Parâmetros das cartas de controle

Tabela 9. Parâmetros das cartas de controle, violações das regras de Nelson e índice de capacidade do processo

Carta / estatística	Linha central	LIC	LSC	Pontos fora de controle	Regras acionadas
Médias — aproveitamento	0,9942	0,9822	1,0062	1990; 2000; 2016	R1; R3 (2014 a 2020)
Amplitudes — aproveitamento	0,0165	0	0,0376	1994; 2000; 2005; 2009; 2016	R1
Individuais — variação anual da soja (%)	5,71	−20,45	31,87	nenhum	—
Amplitude móvel — variação da soja (p.p.)	9,84	0	32,13	nenhum	—
Capacidade do processo	Cpk = 1,84	LIE = 0,95	—	Processo estável e capaz	—

Nota: LIC = limite inferior de controle; LSC = limite superior de controle; LIE = limite inferior de especificação; p.p. = pontos percentuais. R1 = um ponto além de 3σ; R3 = quatro de cinco pontos além de 1σ do mesmo lado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados admitem leitura em três planos: substantivo, sobre a trajetória agrícola do Centro-Oeste; metodológico, sobre o uso de controle estatístico de processo em séries territoriais; e instrumental, sobre a articulação entre estatística oficial e sensoriamento remoto. As subseções seguintes tratam de cada um deles, começando pela cronologia da expansão e da intensificação.

4.1. Dois regimes de crescimento agrícola

O resultado central deste trabalho é a identificação de dois regimes sucessivos de crescimento agrícola no Centro-Oeste, separados pela inflexão de 2005–2006. No primeiro, que se estende de 1985 a 2005, a produção cresceu predominantemente pela incorporação de novas terras: a soja avançou a 632 mil ha por ano no subperíodo 1995–2005, enquanto o índice de sucessão milho–soja caía continuamente até o mínimo de 0,20. No segundo, de 2006 em diante, a expansão horizontal prossegue mas cede espaço relativo à intensificação: entre 2005 e 2015 o milho superou a soja em expansão anual absoluta pela primeira vez na série, e o índice de sucessão subiu de forma monotônica até 0,54.

Essa cronologia é coerente com o que a literatura de sensoriamento remoto vinha documentando para escalas menores. Spera *et al*. (2014) mostraram que a área de dupla safra em Mato Grosso passou de 0,5 Mha em 2001 para 2,9 Mha em 2011, enquanto a área total de agricultura mecanizada cresceu de 3,3 para 5,8 Mha ou seja, a dupla safra respondeu por parcela majoritária do crescimento no período. Macedo *et al.* (2012) documentaram a dissociação entre produção de soja e desmatamento no sul

da Amazônia no final dos anos 2000. Zalles *et al*. (2019), por amostragem estatística do acervo Landsat, estimaram que a área de lavouras intensivas no Brasil passou de 26,0 para 46,1 Mha entre 2000 e 2014, com 80% da nova área proveniente de pastagens e apenas 20% de vegetação natural.

O presente trabalho acrescenta a esse conjunto uma perspectiva de longo prazo e de baixo custo. Ao usar exclusivamente estatística agrícola oficial, cobre 36 anos contínuos período mais longo do que o de qualquer estudo regional baseado em imagens de resolução moderada e permite quantificar a transição entre regimes sem depender de classificação de imagens. A contrapartida é evidente e deve ser explicitada: a PAM não informa a área física ocupada por lavouras, e, portanto, não substitui o mapeamento por sensoriamento remoto na quantificação da conversão de vegetação nativa.

4.2 Complementaridade com produtos de mapeamento de uso e cobertura do solo

A relação entre as duas fontes é de complementaridade, não de concorrência, e a distinção conceitual entre área colhida e área física é a chave dessa articulação. Com um índice de sucessão de 0,54 em 2020, a soma das áreas colhidas das três culturas no Centro-Oeste (27,06 Mha) excede necessariamente a área física ocupada por lavouras temporárias na região. Comparar diretamente esses 27,06 Mha com a área classificada como agricultura em um produto de sensoriamento remoto produziria uma discrepância aparente de dezenas de milhões de hectares, que seria erroneamente interpretada como erro de classificação.

Daí decorre uma recomendação prática. Produtos de mapeamento que pretendam ser validados contra estatísticas agrícolas devem adotar legendas de sistemas de cultivo soja em safra única, soja seguida de milho, soja seguida de algodão em vez de culturas isoladas, abordagem já consolidada na literatura de mapeamento de frequência de cultivo (Spera *et al*., 2014; Arvor *et al*., 2011; Bégué *et al*., 2018). O índice de sucessão calculado neste trabalho a partir de dados oficiais fornece uma referência independente contra a qual a frequência de cultivo estimada por sensoriamento remoto pode ser confrontada em nível estadual e anual, sem custo de aquisição de imagens.

Os dados do MapBiomas oferecem o contraponto necessário sobre a dimensão ambiental que a PAM não captura. A Coleção 11 indica que, entre 1985 e 2025, Mato Grosso reduziu sua cobertura de vegetação nativa de 90% para 61% do território estadual, e que no Cerrado a conversão de pastagem para agricultura totalizou 8,8 milhões de hectares, equivalentes a 10% de toda a área que sofreu transição no bioma (Projeto MapBiomas, 2026). A leitura conjunta das duas fontes é o que permite responder à pergunta relevante: quanto do crescimento da produção decorreu de conversão de vegetação nativa, quanto de conversão de pastagem e quanto de intensificação sobre área já cultivada.

4.3 O controle estatístico de processo como instrumento de auditoria

A contribuição metodológica deste trabalho é demonstrar que cartas de controle constituem instrumento operacional útil para auditar séries longas de indicadores territoriais. A avaliação convencional responde à pergunta “qual é a qualidade deste ano"; as cartas respondem a uma pergunta distinta e complementar: "o

comportamento deste ano é compatível com a variabilidade histórica do processo". Essa segunda pergunta é a que importa para usuários que dependem de comparabilidade interanual do cálculo de taxas de conversão, inventários de emissões, verificação de compromissos setoriais e monitoramento de políticas.

Os sinais detectados têm interpretação física direta e verificável. As violações de 1990, 2000 e 2016 na carta de médias correspondem a anos de anomalia climática, e a coincidência de 2016 com o evento El Niño de 2015/16 é particularmente nítida. A capacidade de distinguir perturbações sistêmicas de perturbações localizadas apenas pela leitura conjunta das cartas de posição e de dispersão em 1990 aparece só na carta de médias, 1994 e 2009 só na de amplitudes é a principal vantagem operacional do método, e não requer nenhuma informação além da própria série.

Igualmente relevante é a detecção de causas especiais benéficas. As regras de sequência identificaram uma mudança sustentada de patamar do aproveitamento a partir de 2014, elevando a média para 0,9974 no período 2012–2020. Em um sistema de monitoramento operacional, esse sinal recomendaria o recálculo dos limites de controle para o período recente, evitando que a maior variabilidade do início da série mascare deteriorações futuras procedimento padrão em controle de processo e raramente formalizado em programas de monitoramento territorial.

Cabe registrar uma advertência metodológica sobre a aplicação de cartas de controle a séries com tendência. O aproveitamento é um indicador estacionário por construção uma razão cujo valor esperado é próximo da unidade e por isso admite diretamente o tratamento por cartas de Shewhart. As séries de área colhida, ao contrário, apresentam tendência monotônica forte, e aplicar-lhes cartas de controle sem transformação prévia produziria violações espúrias já nos primeiros anos, refletindo apenas a tendência e não causas especiais. Foi por essa razão que a segunda carta monitorou a taxa de variação anual, e não o nível da área, transformação que remove a tendência e restaura a estacionariedade requerida pelo método.

O contraste entre as duas cartas construídas merece atenção. O aproveitamento apresentou três violações e um deslocamento de patamar; a taxa de expansão da soja, nenhuma violação em 35 anos. A diferença não é acidental. O aproveitamento é um indicador de resposta a choques exógenos de curto prazo sobretudo climáticos e por isso registra eventos discretos. A taxa de expansão reflete decisões de investimento cuja resposta é distribuída no tempo, e comporta-se como um processo estável de variância elevada. Reconhecer essa diferença é essencial para escolher o indicador apropriado a cada finalidade de monitoramento.

4.4 Área, rendimento e os limites da intensificação

A decomposição do crescimento da produção oferece o teste mais direto da hipótese de intensificação. Se o crescimento decorresse majoritariamente de ganhos de rendimento e de frequência de cultivo, esperar-se-ia contribuição minoritária da expansão de área. Não é o que se observa: mesmo com produtividade crescendo 79% na soja e 179% no milho, a expansão da área colhida respondeu por 75,3% e 67,8% do crescimento da produção, respectivamente. A intensificação é real e mensurável, mas não substituiu a incorporação de área ao longo do período completo.

Essa conclusão precisa, contudo, ser lida à luz da própria definição de área colhida. Parte do que aqui aparece como expansão de área é, na verdade, intensificação temporal: quando um talhão já cultivado com soja passa a receber também milho de segunda safra, a área colhida regional aumenta sem que um único

hectare novo de vegetação nativa ou de pastagem seja convertido. É exatamente por isso que o índice de sucessão foi construído separadamente. A leitura conjunta dos dois resultados é o que produz a interpretação correta: a produção cresceu por três vias mais terra, mais safras por ano e mais quilos por hectare e a separação entre a primeira e a segunda exige informação de área física que só o sensoriamento remoto pode fornecer.

A homogeneidade da produtividade da soja entre as unidades da federação em 2020, com amplitude inferior a 3% entre o menor e o maior valor, sugere convergência tecnológica avançada e, por consequência, margem limitada para ganhos adicionais por difusão de práticas já disponíveis. O milho apresenta situação distinta, com amplitude de 26% entre Mato Grosso do Sul e Goiás, o que indica espaço de convergência ainda não realizado e, portanto, potencial de aumento de produção sem expansão de área.

4.5 A trajetória do algodão como caso de realocação produtiva

O comportamento do algodão merece tratamento próprio porque contraria o padrão das outras duas culturas. Soja e milho cresceram em todas as unidades da federação, ainda que a taxas distintas; o algodão cresceu em uma e retraiu em duas, com tendência negativa estatisticamente significativa em Mato Grosso do Sul ($\tau = -0{,}386$; $p = 0{,}001$). O resultado agregado positivo para a região oculta, portanto, uma substituição espacial e não uma expansão generalizada.

Três fatores concorrem para explicar esse movimento. O primeiro é agronômico: o algodão de segunda safra, semeado imediatamente após a colheita da soja, exige que a estação chuvosa se prolongue o suficiente para completar um ciclo longo, condição atendida nas chapadas mato-grossenses e não nas áreas mais austrais da região. O segundo é fitossanitário: a concentração da cultura em áreas de manejo tecnificado e a adoção de programas regionais de controle do bicudo favoreceram unidades produtivas de grande escala. O terceiro é econômico: a cotonicultura brasileira reorganizou-se ao longo dos anos 1990 em torno de unidades altamente mecanizadas e verticalizadas, processo incompatível com a estrutura fundiária mais fragmentada das áreas produtoras tradicionais.

Do ponto de vista do monitoramento, esse caso ilustra por que a análise agregada é insuficiente. Um indicador regional de área de algodão apresentaria crescimento monotônico significativo e nada revelaria sobre a realocação subjacente. A desagregação por unidade da federação, combinada ao teste de tendência aplicado separadamente a cada série, é o que torna o fenômeno visível e o mesmo raciocínio se aplica, em escala menor, à desagregação municipal.

4.6 Convergência e divergência com estudos baseados em sensoriamento remoto

Confrontar os resultados aqui obtidos com os de estudos baseados em imagens orbitais é útil justamente porque as duas abordagens medem grandezas diferentes. Spera *et al*. (2014) estimaram, para Mato Grosso, uma área de agricultura mecanizada de 5,8 Mha em 2011, dos quais 2,9 Mha em dupla safra. A área colhida de soja e milho declarada à PAM para Mato Grosso naquele mesmo ano soma valor consideravelmente superior, e a diferença é inteiramente explicada pela contabilização dupla dos talhões com duas safras. Longe de indicar inconsistência entre as fontes, essa diferença é a assinatura quantitativa da própria dupla safra, e pode ser usada de

forma construtiva: a razão entre a soma das áreas colhidas e a área física mapeada é, por definição, o índice de intensificação do cultivo.

A convergência é igualmente instrutiva quanto à cronologia. O índice de sucessão calculado neste trabalho localiza a inflexão do regime de crescimento em 2005–2006, e Spera *et al*. (2014) identificam, com dados independentes de sensoriamento remoto, uma aceleração da dupla safra em Mato Grosso concentrada exatamente na segunda metade da década de 2000. Arvor *et al*. (2011) chegaram a datação semelhante a partir de séries temporais de EVI do sensor MODIS. Que três abordagens metodologicamente independentes de estatística agrícola declarada, classificação de imagens de resolução moderada e análise de séries de índices de vegetação convirjam para a mesma datação reforça a robustez do diagnóstico.

Há, contudo, uma divergência que merece registro. Zalles *et al*. (2019) estimam que 80% da nova área de lavouras intensivas no Brasil entre 2000 e 2014 proveio de pastagens e apenas 20% de vegetação natural. A estatística agrícola, por sua própria natureza, é incapaz de confirmar ou refutar essa partição: ela registra que a área colhida cresceu, mas nada informa sobre a cobertura que ocupava previamente o terreno. Qualquer afirmação sobre a origem física da expansão neste trabalho seria, portanto, inferência não sustentada pelos dados analisados, e foi deliberadamente evitada. Essa é a fronteira precisa entre o que a estatística agrícola pode e não pode responder, e demarcá-la explicitamente é parte da contribuição metodológica pretendida.

Iniciativas como o MapBiomas (2026) e os sistemas de classificação de séries temporais desenvolvidos para a agricultura brasileira (Souza *et al*., 2020; Picoli et al., 2018) preenchem exatamente essa lacuna, e sua articulação com a estatística oficial por meio de legendas de sistemas de cultivo e de índices de frequência de cultivo comparáveis é o caminho mais promissor para um monitoramento que seja simultaneamente espacialmente explícito, historicamente longo e verificável contra fontes independentes.

4.7 Implicações para políticas públicas e sistemas de monitoramento

A concentração produtiva documentada altera o perfil de risco da oferta agrícola nacional. Em 1985, a área de milho do Centro-Oeste representava 8,9% do total brasileiro, distribuída de forma relativamente equilibrada entre as unidades da federação; em 2020, a região respondia por 49,8% da área nacional, com Mato Grosso concentrando 58,5% da área regional. No algodão a concentração é ainda mais extrema, com Mato Grosso detendo 94,2% da área do Centro-Oeste e a região respondendo por 74,1% do total nacional. Uma anomalia climática severa e espacialmente localizada nas chapadas mato-grossenses teria hoje impacto sobre a oferta nacional incomparavelmente maior do que teria três décadas atrás.

Esse diagnóstico tem consequência direta para o desenho de sistemas de monitoramento. A resolução espacial adequada não é uma propriedade fixa, mas função da concentração do fenômeno monitorado: para culturas dispersas, o acompanhamento estadual é suficiente; para o algodão brasileiro, cuja área se concentra em um punhado de microrregiões, o monitoramento estadual perdeu poder informativo e a escala municipal ou mesmo a de talhão, acessível apenas por sensoriamento remoto tornou-se necessária. A trajetória documentada neste trabalho é, nesse sentido, um argumento a favor da integração entre estatística oficial e observação da Terra, e não uma defesa da suficiência da primeira.

Do ponto de vista ambiental, a leitura conjunta com os dados do MapBiomas sugere uma agenda específica. Se a expansão de área respondeu por cerca de 70% do crescimento da produção, e se a maior parte da nova área provém de pastagens previamente estabelecidas como estimam Zalles *et al*. (2019) para o Brasil entre 2000 e 2014, então o instrumento de política com maior retorno esperado não é a restrição direta à agricultura, mas o aumento da produtividade da pecuária, que libera área sem conversão adicional. A quantificação regional dessa cadeia causal, contudo, exige informação de área física que a estatística agrícola não fornece, e permanece como agenda de pesquisa.

Há, por fim, uma implicação metodológica de alcance mais amplo. As séries oficiais brasileiras de estatística agrícola cobrem mais de cinco décadas com periodicidade regular e granularidade municipal, e constituem um dos acervos mais longos e consistentes disponíveis para qualquer fronteira agrícola tropical. Sua submissão sistemática a instrumentos de controle estatístico de processo e procedimento de custo computacional desprezível e sem requisito de dados adicionais permitiria construir, para o conjunto do território nacional, um sistema de alerta sobre anomalias de safra e sobre inconsistências de reporte estatístico. Nada disso requer novos levantamentos; requer apenas tratar a série existente como um processo sob acompanhamento.

Uma observação final sobre o alcance do método. O controle estatístico de processo não substitui modelos explicativos: ele não estima o efeito do clima sobre a safra, nem atribui causalidade às políticas públicas. O que faz, e faz bem, é separar o que merece explicação do que não merece distinguir os anos em que algo de fato ocorreu daqueles em que a série apenas oscilou dentro de sua variabilidade natural. Essa triagem tem valor prático considerável em séries longas, onde a inspeção visual tende a superidentificar padrões, e é justamente o ponto de partida para a modelagem causal, não seu substituto.

4.8 Implicações e limitações

A concentração produtiva documentada tem implicações relevantes para a gestão de risco. Com o Centro-Oeste respondendo por 45,1% da área de soja, 49,8% da de milho e 74,1% da de algodão do país, e com Mato Grosso concentrando 94,2% do algodão regional, a exposição da oferta nacional a eventos climáticos localizados aumentou substancialmente ao longo do período. O índice de capacidade favorável obtido para o agregado regional não deve ser lido como ausência de risco: ele reflete a compensação entre unidades da federação, e a análise por unidade revelaria capacidade inferior, sobretudo em anos de El Niño.

Cinco limitações devem ser consideradas. Primeiro, a PAM registra área colhida e área plantada declaradas, não área física observada, de modo que as conclusões sobre intensificação dependem da premissa bem sustentada para o Centro-Oeste, mas não universal de que a soja é cultivada essencialmente em primeira safra e o milho majoritariamente em sucessão. Segundo a série analisada encerra-se em 2020, em função da versão da base utilizada; a extensão até o ano mais recente é imediata e recomendada. Terceiro, a análise foi conduzida em nível estadual, e a agregação oculta heterogeneidade intermunicipal relevante, sobretudo entre as chapadas de alta aptidão e as áreas de relevo mais dissecado. Quarto, os limites de controle foram estimados a partir da própria série; havendo mudança sustentada de patamar, como aqui detectado, seu recálculo periódico é necessário sob pena de perda de

sensibilidade do procedimento. Quinto, a decomposição do crescimento entre área e produtividade foi calculada entre os anos extremos da série e é, portanto, sensível às condições específicas de 1985 e de 2020; decomposições móveis por subperíodo, não realizadas aqui, forneceriam um retrato mais estável da evolução das contribuições relativas.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou a expansão e a intensificação das lavouras temporárias de soja, milho e algodão no Centro-Oeste brasileiro entre 1985 e 2020, utilizando exclusivamente dados públicos da Produção Agrícola Municipal do IBGE agregados a partir dos 467 municípios da região. A área colhida das três culturas cresceu 6,7 vezes, de 4,04 para 27,06 milhões de hectares, com tendências monotônicas altamente significativas para todas elas no agregado regional.

A análise identificou dois regimes sucessivos de crescimento, separados pela inflexão de 2005–2006. No primeiro, a produção cresceu predominantemente pela incorporação de novas terras; no segundo, pela intensificação temporal, medida pelo índice de sucessão milho–soja, que subiu de 0,20 em 2005 para 0,54 em 2020. Entre 2005 e 2015 o milho superou a soja em expansão anual absoluta pela primeira vez na série. Paralelamente, o algodão sofreu reorganização espacial radical, com Mato Grosso passando de 11,5% para 94,2% da área regional enquanto Mato Grosso do Sul e Goiás perdiam área absoluta.

A produtividade cresceu de forma monotônica e significativa nas três culturas, com ganhos de 79% na soja, 179% no milho e 160% no algodão. Ainda assim, a decomposição logarítmica do crescimento da produção atribuiu a maior parcela à expansão de área 75,3% na soja, 67,8% no milho e 68,8% no algodão, o que indica que a intensificação, embora real, foi complementar e não substitutiva à incorporação de área ao longo do período completo.

A aplicação de cartas de controle demonstrou-se instrumento eficaz de auditoria da série. As cartas de médias e amplitudes do aproveitamento identificaram objetivamente 1990, 2000 e 2016 como anos de perturbação, distinguiram perturbações sistêmicas de localizadas pela leitura conjunta das duas cartas, e detectaram deslocamento sustentado e benéfico de patamar a partir de 2014. O índice Cpk de 1,84 indica processo estável e capaz frente a uma especificação de aproveitamento mínimo de 0,95. A carta de individuais da taxa de expansão da soja não registrou violações em 35 anos, evidenciando que a expansão, apesar de sua magnitude, comportou-se como processo estatisticamente estável.

Do conjunto dos resultados emerge uma leitura integrada da trajetória regional. A produção de soja, milho e algodão no Centro-Oeste multiplicou-se por fatores entre 10 e 24 ao longo de 36 anos, resultado da ação simultânea de três mecanismos: a incorporação de área, responsável por cerca de 70% do crescimento; o aumento do número de safras por ano, evidenciado pela alta do índice de sucessão a partir de 2006; e o ganho de produtividade, responsável por parcela entre 25% e 32% conforme a cultura. Nenhum desses mecanismos é dispensável para explicar a trajetória, e a separação entre eles viável a partir de dados públicos e de baixo custo analítico é condição para qualquer avaliação de sustentabilidade que pretenda distinguir crescimento com conversão de crescimento sem conversão.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a extensão da análise até o ano mais recente disponível, a desagregação em nível municipal, a incorporação de covariáveis

climáticas para atribuição das causas especiais detectadas, e a articulação sistemática entre a série de estatística agrícola e produtos de mapeamento de uso e cobertura do solo por meio de legendas de sistemas de cultivo.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507. Acesso em: 3 set. 2026.

ARVOR, D.; DUBREUIL, V.; RONCHAIL, J.; SIMÕES, M.; FUNATSU, B. M. Spatial patterns of rainfall regimes related to levels of double cropping agriculture systems in Mato Grosso (Brazil). **International Journal of Climatology**, v. 34, p. 2622-2633, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1002/joc.3863. Acesso em: 3 set. 2026.

ARVOR, D.; JONATHAN, M.; MEIRELLES, M. S. P.; DUBREUIL, V.; DURIEUX, L. Classification of MODIS EVI time series for crop mapping in the state of Mato Grosso, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 7847-7871, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01431161.2010.531783. Acesso em: 3 set. 2026.

ARVOR, D.; MEIRELLES, M. S. P.; DUBREUIL, V.; BÉGUÉ, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Analyzing the agricultural transition in Mato Grosso, Brazil, using satellite-derived indices. **Applied Geography**, v. 32, p. 702-713, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.010. Acesso em: 3 set. 2026.

BÉGUÉ, A.; ARVOR, D.; BELLON, B.; BETBEDER, J.; DE ABELLEYRA, D.; FERRAZ, R. P. D. et al. Remote sensing and cropping practices: a review. **Remote Sensing**, v. 10, art. 99, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs10010099. Acesso em: 3 set. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: CONAB, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras. Acesso em: 3 set. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal**: tabela 1612. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612. Acesso em: 5 set. 2026.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 4. ed. London: Charles Griffin, 1975.
KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, p. 707-713, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x. Acesso em: 5 set. 2026.

LAMBIN, E. F.; MEYFROIDT, P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of**

the United States of America, v. 108, p. 3465-3472, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1073/pnas.1100480108. Acesso em: 5 set. 2026.

MACEDO, M. N.; DEFRIES, R. S.; MORTON, D. C.; STICKLER, C. M.; GALFORD, G. L.; SHIMABUKURO, Y. E. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, p. 1341-1346, 2012. Disponível: https://doi.org/10.1073/pnas.1111374109. Acesso em: 5 set. 2026.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945. Disponível em: https://doi.org/10.2307/1907187. Acesso em: 5 set. 2026.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2019.

NELSON, L. S. The Shewhart control chart: tests for special causes. **Journal of Quality Technology**, v. 16, p. 237-239, 1984. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00224065.1984.11978921. Acesso em: 5 set. 2026.

OLOFSSON, P.; FOODY, G. M.; HEROLD, M.; STEHMAN, S. V.; WOODCOCK, C. E.; WULDER, M. A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. **Remote Sensing of Environment**, v. 148, p. 42-57, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015. Acesso em: 5 set. 2026.

PICOLI, M. C. A.; CAMARA, G.; SANCHES, I.; SIMÕES, R.; CARVALHO, A.; MACIEL, A. et al. Big earth observation time series analysis for monitoring Brazilian agriculture. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 328-339, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.002. Acesso em: 5 set. 2026.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 11 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (1985-2025)**. São Paulo: MapBiomas, 2026. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org. Acesso em: 5 set. 2026.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**: versão 3.34 LTR. [S. l.]: Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: https://qgis.org. Acesso em: 5 set. 2026.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org. Acesso em: 5 set. 2026.

SCRUCCA, L. qcc: an R package for quality control charting and statistical process control. **R News**, v. 4, p. 11-17, 2004. Disponível em: https://journal.r-project.org/articles/RN-2004-003/RN-2004-003.pdf. Acesso em: 5 set. 2026.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934. Acesso em: 5 set. 2026.

SHEWHART, W. A. **Economic control of quality of manufactured product**. New York: D. Van Nostrand, 1931.

SONG, X.-P.; HANSEN, M. C.; POTAPOV, P.; ADUSEI, B.; PICKERING, J.; ADAMI, M. et al. Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. **Nature Sustainability**, v. 4, p. 784-792, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41893-021-00729-z. Acesso em: 5 set. 2026.

SOUZA JR., C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, art. 2735, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs12172735. Acesso em: 5 set. 2026.

SPERA, S. A.; COHN, A. S.; VANWEY, L. K.; MUSTARD, J. F.; RUDORFF, B. F.; RISSO, J.; ADAMI, M. Recent cropping frequency, expansion, and abandonment in Mato Grosso, Brazil had selective land characteristics. **Environmental Research Letters**, v. 9, art. 064010, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064010. Acesso em: 5 set. 2026.

SPERA, S. A.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, p. 3405-3413, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1111/gcb.13298. Acesso em: 5 set. 2026.

STRASSBURG, B. B. N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R. et al. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, art. 0099, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099. Acesso em: 5 set. 2026.

ZALLES, V.; HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; STEHMAN, S. V.; TYUKAVINA, A.; PICKENS, A.; SONG, X.-P.; ADUSEI, B.; OKPA, C.; AGUILAR, R.; JOHN, N.; CHAVEZ, S. Near doubling of Brazil's intensive row crop area since 2000. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 116, p. 428-435, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1073/pnas.1810301115. Acesso em: 5 set. 2026.