

NÃO BASTA SER “TECH”: O CHOQUE DE PRODUTIVIDADE DA SOJA TRANSGÊNICA NO DESMATAMENTO E USOS DO SOLO NO BRASIL

Lucas de Almeida Nogueira da Costa

Mestre em Economia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Romero Cavalcanti Barreto da Rocha

Doutor em Economia pela Universidade Pontifícia Católica (PUC-Rio) e professor no Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE-UFRJ)

Palavras-chave: Desmatamento. Choque de produtividade da soja. Intensificação agropecuária.

Tema: (iii) Uso sustentável do solo e desmatamento.

RESUMO

Este artigo utiliza o contexto da introdução da semente transgênica da soja no Brasil para estimar potenciais efeitos desse choque de produtividade agrícola nos usos do solo dos três principais biomas brasileiros. Por meio de um modelo empírico de diferenças-em-diferenças ao nível do *pixel* de 9 km × 9 km e da base detalhada do MapBiomias, foi possível estimar se o aumento potencial da produtividade da soja provocado pela inovação da semente transgênica influenciou na expansão ou diminuição dos principais usos naturais e agropecuários do solo, considerando possíveis heterogeneidades entre os biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica. Os principais resultados encontrados sugerem que, na Amazônia, os efeitos desse choque tendem para um movimento similar ao paradoxo de Jevons, no qual o aumento da produtividade do fator de produção terra teria incentivado ainda mais a sua utilização ou ocupação. Nos biomas com usos do solo mais consolidados, como Mata Atlântica e Cerrado, esse choque de produtividade tampouco teria sido capaz de sustentar uma trajetória de transição florestal baseada no *land sparing*. Nesses casos, as principais transições percebidas foram de usos agropecuários menos produtivos e rentáveis para a soja, enquanto na Amazônia foi possível observar a diminuição de vegetação nativa para ocupação não só pela soja, mas também para usos agropecuários menos rentáveis, como as pastagens. Sabendo que a intensificação da produção agropecuária e os ganhos de produtividade são desejados e estratégicos para o desenvolvimento do país, este artigo contribui para o entendimento de que essas estratégias não levam automaticamente para o caminho da conservação ambiental. É preciso que políticas públicas que fiscalizam e monitoram atividades ilegais sejam capazes de impedir a expansão da fronteira do desmatamento e andem juntas ao desenvolvimento sustentável dos setores agropecuários, evitando os custos sociais de potenciais externalidades negativas, de modo que esse desenvolvimento seja sinérgico ao combate às mudanças do clima.

INTRODUÇÃO

Em 2020, o setor da Agropecuária foi responsável por cerca de 72,9% das emissões de gases do efeito estufa (GEE) no Brasil. Do total de emissões de GEE, 46,2% decorreram de mudanças no uso da terra – que ocorrem majoritariamente pela ocupação de floresta primária pela agropecuária. Por sua vez, as emissões diretas do setor agropecuário foram responsáveis por 26,7% das emissões totais de GEE do Brasil – mais até do que os 18,2% das emissões de GEE do setor energético.¹ Além dessa contribuição do setor agropecuário para as emissões de GEE e, conseqüentemente, para os problemas associados às mudanças climáticas, a perda de florestas pelo desmatamento deve ser associada a diversas outras questões, como o comprometimento do equilíbrio ecológico, a deterioração da regulação hídrica, da qualidade do ar e de outros serviços ecossistêmicos, além da perda da biodiversidade brasileira e de potenciais rendimentos derivados.

O desmatamento de florestas tropicais no mundo e, em particular, no Brasil está associado a diversos fatores, desde mecanismos de mercado (ASSUNÇÃO; GANDOUR; ROCHA, 2015), especulação da terra, marcos regulatórios e políticas públicas (ASSUNÇÃO *et al.*, 2020; BURGESS; COSTA; OLKEN, 2018; GANDOUR, 2018; HARGRAVE; KIS-KATOS, 2013; SANT’ANNA; COSTA, 2021), até falta de fiscalização e governança (CORREIA-SILVA; RODRIGUES, 2019; REYDON; FERNANDES; TELLES, 2020). Apesar de muitos estudos contribuírem para medir e explicar o impacto desses fatores,

¹ Dados coletados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 31 out. 2022.

de forma geral a dinâmica de ocupação e transição do solo ainda não é totalmente conhecida.

Em particular, um componente relevante para a compreensão dos padrões de transição do uso do solo e do desmatamento – que, por vezes, é deixado de lado pela literatura – é a importância da intensificação e dos ganhos de produtividade da produção agrícola. Se, por um lado, alguns mecanismos plausíveis são capazes de explicar um impacto negativo dos ganhos de produtividade da agropecuária no desmatamento, por outro esse efeito pode ser ambíguo, dependendo do contexto – semelhante ao paradoxo de Jevons, em que o uso mais eficiente de um insumo a partir de uma nova tecnologia não leva necessariamente à redução do seu consumo. No caso brasileiro, algumas evidências preliminares apontam que choques de produtividade agrícola promovidos pelo acesso à eletricidade (ASSUNÇÃO *et al.*, 2017; SZERMAN *et al.*, 2022) e pela revolução da soja no Cerrado nos anos 1970 (ASSUNÇÃO; BRAGANÇA, 2015) teriam sido capazes de poupar terra e frear o desmatamento. Porém, apesar do avanço tecnológico na agropecuária na segunda metade do século XX e no século XXI, a expansão de pastagens e de usos agrícolas (como soja e cana-de-açúcar) em áreas de vegetação nativa não teria se interrompido no período.

Portanto, este artigo visa abordar a seguinte pergunta: quais são os potenciais efeitos diretos de um choque de produtividade nos usos do solo no Brasil? Mais especificamente, como contribuição principal, busca-se estimar, com base em um modelo de diferenças-em-diferenças não binário, de que modo o choque de produtividade gerado pela soja transgênica no final dos anos 1990 pode ter impactado a ocupação

dos solos de forma heterogênea entre os biomas brasileiros. Para isso, parte-se da contribuição metodológica de Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016), que estudam os efeitos da soja transgênica na indústria e no mercado de trabalho, e das séries históricas detalhadas de uso do solo da Coleção 6 do MapBiomas (2021).²

Este trabalho busca contribuir com a literatura ao estimar os efeitos no uso do solo de um dos choques de produtividade mais relevantes para a agricultura brasileira – como foi o caso da introdução da semente transgênica de soja – a partir de uma estratégia de identificação consolidada por Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016). O artigo também avança ao estimar tais efeitos a partir de uma base altamente detalhada, tanto na dimensão temporal (com dados anuais entre 1993 e 2012) quanto na dimensão espacial (com *pixel* de 9 km × 9 km). Além disso, as estimações foram feitas separadamente para os três principais biomas brasileiros, permitindo levar em conta potenciais heterogeneidades.

Os resultados encontrados indicam que, no bioma Amazônia, o choque de produtividade da soja transgênica teve efeitos significativos na diminuição de florestas e no aumento de usos como pastagem e soja. Esse resultado sugere que é possível a prevalência de um paradoxo de Jevons para a terra nesse bioma, de forma que choques de produtividade não possam atuar sozinhos como alternativa a políticas de conservação. Nos biomas Mata Atlântica e Cerrado, em que o uso do solo se apresenta em fases mais consolidadas, os efeitos em vegetações nativas não são significativos, mas o choque de produtividade gerou a

² O MapBiomas consiste em um projeto de mapeamento que busca entender a dinâmica do uso do solo no Brasil e disponibilizar dados georreferenciados anuais do uso do solo brasileiro.

substituição de usos que tendem a ser menos rentáveis, como pastagem e outras agriculturas temporárias, por soja. Nesses casos, o choque de produtividade da soja transgênica não teria sido capaz de levar de forma automática a uma trajetória de transição florestal.

O trabalho está dividido em oito seções, além desta primeira. A segunda seção apresenta revisão da literatura correlata sobre a relação do choque de produtividade com desmatamento e uso da terra e da literatura sobre ocupação do solo e transição florestal. Na terceira seção são apresentadas as principais variáveis deste estudo e suas construções. Na quarta, são expostas algumas estatísticas descritivas e matrizes de transição do uso do solo que auxiliam na interpretação dos resultados principais. Na quinta parte é apresentada a estratégia empírica, além do modelo de identificação do efeito do choque de produtividade da soja transgênica no uso do solo. Na sexta, constam os principais resultados do modelo empírico e os *event studies*. Por fim, uma breve seção de considerações finais encerra este artigo.

REVISÃO DA LITERATURA

No Brasil, algumas evidências preliminares sobre a causalidade entre choque de produtividade e desmatamento merecem destaque. Assunção e Bragança (2015) observam, no contexto da revolução da soja entre 1960 e 1985, que regiões que passaram a ser mais propensas à soja e à intensificação não aumentaram relativamente seu desmatamento, verificando-se nelas a substituição de pastagens por agricultura e até

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

um aumento de áreas florestais. Utilizando uma estratégia empírica distinta, Assunção e outros (2017) e Szerman e outros (2022) mostram que ganhos de produtividade da agricultura a partir da eletrificação de diversas regiões reduziram o desmatamento nesses municípios. No campo teórico, esses argumentos são sustentados por modelos similares, nos quais um indivíduo maximizador e com considerável restrição a crédito tem que alocar seu capital em uma unidade de terra com gado ou com agricultura – sendo a primeira menos capital-intensiva que a segunda. Após um choque de produtividade na agricultura (ou no uso do solo genérico mais capital-intensivo), a alocação desse capital se move ainda mais em direção à agricultura, tornando a produção global menos extensiva e aumentando, ao mesmo tempo, a área de agricultura e de floresta secundária resultante do abandono da pastagem. Caso não houvesse restrição de capital, o efeito desse choque de produtividade para o indivíduo maximizador seria expandir as terras da produção mais capital-intensiva sem substituir ou abandonar a produção menos capital-intensiva.

Portanto, com a insuficiência de políticas públicas apropriadas para frear o desmatamento, o ganho de produtividade e a intensificação deveriam ser capazes de preencher parcialmente essa função por meio de alguns mecanismos, como Szerman e outros (2022) argumentam. Vale citar, por exemplo, a substituição de culturas menos produtivas por outras com maior potencial de produtividade, como uma alternativa ao aumento da produção pela margem extensiva. Os avanços tecnológicos viabilizam novos investimentos e melhor infraestrutura, diminuindo também a necessidade de ocupação de mais terra para o aumento da produção. Além disso, o progresso tecnológico pode estar

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

correlacionado, ao mesmo tempo, com o aumento da intensidade da produção e com melhores condições de *enforcement* da lei e dos direitos de propriedade.

Esses mecanismos e alguns outros são reconhecidos na literatura internacional e seguem algumas das proposições iniciais da teoria de transição florestal, estabelecida nos anos 1990 por Mather (1992) e posteriormente desenvolvida. Simplificadamente, a teoria da transição florestal consiste em um encadeamento lógico no qual, primeiramente, há expansão de áreas agrícolas e diminuição de florestas como resposta ao crescimento acelerado da demanda por produtos agrícolas, dado o aumento da população. Posteriormente, com a diminuição da taxa de crescimento da população e com as revoluções agrícolas que provocam consideráveis ganhos de produtividade, o índice de desmatamento cai até um ponto em que há mais área agrícola do que o necessário para atender à demanda corrente. Portanto, os ganhos de produtividade são entendidos como essenciais para que seja possível “poupar” terra e permitir que as transições florestais se estabeleçam, em consonância com os modelos teóricos propostos por Assunção e Bragança (2015) e Szerman e outros (2022) para o Brasil.

Porém, se o ganho de produtividade é condição necessária para diminuir o desmatamento ou até mesmo levar a uma transição florestal, ele não deve ser entendido como condição suficiente. Mather (1992) ressalta que a relação do crescimento da demanda com o crescimento da produtividade não deve induzir deterministicamente os movimentos de transição florestal, uma vez que “fatores complicadores” como a urbanização, a política de uso da terra e os padrões de comércio podem

desviar a trajetória da transição. Portanto, a condição necessária de aumento da produtividade para atender à demanda da população com uma área agrícola menor deve estar associada às ações e percepções das comunidades e dos governantes de que as florestas e seus serviços ecossistêmicos são benéficos e necessários.

Algumas contribuições da literatura de transição florestal buscam sistematizar os caminhos pelos quais diferentes trajetórias de transição florestal podem se dar e quais as condições necessárias para cada um deles (LAMBIN; MEYFROIDT, 2010; MEYFROIDT; LAMBIN, 2011; RUDEL, 2009; RUDEL *et al.*, 2005). Entre essas contribuições, vale citar o arcabouço teórico construído por Lambin e Meyfroidt (2010). Segundo os autores, uma trajetória sustentada de transição florestal baseada no aumento da produtividade da terra só seria possível se ocorresse por meio da escassez florestal ou da intensificação do pequeno produtor rural. Caso contrário, o resultado sobre a trajetória de transição florestal seria incerto, podendo variar de acordo com uma série de outras condições (mercado de trabalho, imigração, produção para o abastecimento local ou global, lucratividade, políticas conservacionistas etc.).

Portanto, interpretando os modelos de Assunção e Bragança (2015) e Szerman e outros (2022) a partir desse arcabouço teórico, é improvável que os ganhos de produtividade observados no Brasil constituam alternativa a políticas de conservação de florestas e levem automaticamente a um caminho de transição florestal. Uma vez que a intensificação no Brasil não ocorre pela escassez de terra – pelo contrário, na prática há disponibilidade de terra em um país de fronteira quase aberta –, tampouco pela intensificação do pequeno produtor rural –

uma vez que a concentração rural no Brasil não é uma questão superada (SANT’ANNA, 2017) –, então os efeitos desses choques de produtividade no contexto brasileiro dependem de diversas outras condições.

Fora da literatura de transição florestal, muitos estudos ressaltam mecanismos que podem impedir ou dificultar uma trajetória sustentada de conservação. É essencial que se leve em conta, por exemplo, o tipo de progresso tecnológico, os produtos agrícolas que mais se beneficiam, as elasticidades preço-demanda, o efeito no custo da produção e na lucratividade, o impacto no preço da terra e a qualidade da governança e da definição dos direitos de propriedade (BYERLEE; STEVENSON; VILLORIA, 2014; CEDDIA *et al.*, 2014; EWERS *et al.*, 2009; GARRETT *et al.* 2018; GIL *et al.*, 2018; HORNBECK, 2010; KUBITZA *et al.*, 2018; PHELPS *et al.*, 2013). Além desses fatores, outro ponto relevante que Szman e outros (2022) levantam é a possibilidade de existir um efeito de aumento da produção na margem extensiva, caso o choque de produtividade aumente o lucro do agricultor mais do que a *outside option*, ou seja, mais do que o custo de oportunidade de ofertar a força de trabalho fora da agropecuária.

Outros autores destacam também a importância do fenômeno conhecido como *indirect land use change* (ILUC), em que a intensificação agrícola em determinado local pode estimular o desmatamento de outras áreas, principalmente na fronteira do desmatamento (ARIMA *et al.*, 2011; RICHARDS; WALKER; ARIMA, 2014). Por fim, vale destacar a importância de inovações tecnológicas que gerem aumento da demanda por produtos agrícolas, como é o caso dos biocombustíveis no Brasil, que têm resultados ambíguos em termos de emissão de GEE

por estimular indiretamente a ocupação de florestas (FERREIRA FILHO; HORRIDGE, 2014; LAPOLA *et al.*, 2010; SÁ; PALMER; DI FALCO, 2013; SEARCHINGER *et al.*, 2008). Portanto, apesar da ideia tentadora de que incentivar o mercado a se tornar mais eficiente pode também promover a conservação florestal, políticas públicas apropriadas devem levar em conta os possíveis *trade-offs* e minimizar potenciais externalidades negativas.

No Brasil, onde os direitos de propriedade da terra não são bem definidos e a fronteira do desmatamento é, na prática, quase aberta, é especialmente interessante que um modelo teórico realista incorpore à função de retornos esperados um componente de ganho especulativo de capital, com a consolidação dos direitos de propriedade de uma “nova terra”. Young (1997) propõe um modelo de portfólio no qual o indivíduo busca maximizar o seu retorno esperado com os ativos que têm à disposição. Em geral, existem dois componentes principais dos ativos: um componente corrente, relacionado aos retornos da produção do ativo no presente, e um componente de capital, que visa captar a potencial depreciação ou apreciação do ativo – simplificada, a diferença entre o valor de compra e o valor de venda do ativo. No caso de um ativo como uma terra agricultável na fronteira do desmatamento, a ocupação e produção inicial podem fazer com que o componente de capital seja positivo e elevado na ótica do produtor, uma vez que essa ocupação pode consolidar o direito de propriedade dele sobre aquela terra e valorizá-la nesse processo de mercantilização.³ Uma vez que esse direito de propriedade é consolidado e transferível a terceiros,

³ É importante destacar que aqui não se consideram potenciais efeitos de depreciação sobre o valor intrínseco à floresta conservada.

o retorno esperado da terra pode ser bem maior do que apenas o componente corrente da produção.

Levando em consideração o que se conhece tacitamente sobre o contexto brasileiro, nas últimas décadas observaram-se ganhos de produtividade muito significativos em culturas capital-intensivas, como a soja, paralelamente à expansão da fronteira do desmatamento, com a ocupação de floresta por pastagens, principalmente. Portanto, no contexto macro brasileiro, as proposições teóricas de Assunção e Bragança (2015) e Szerman e outros (2022) não parecem ter operado como força predominante, no sentido de que ganhos expressivos de produtividade associados à restrição de capital deveriam substituir uma agropecuária de tendência extensiva por uma mais intensiva. Em particular, a expansão da soja nas últimas décadas, tendo como um importante fator a introdução inovadora da sua semente transgênica, deu-se tanto em áreas parcialmente ocupadas por essa e por outras culturas como em áreas de floresta primária – como é possível observar na quarta seção, a partir das estatísticas descritivas do MapBiomias 6. Portanto, nesse contexto, é caro a essa literatura que se adicionem novas evidências, levando em conta um importante choque de produtividade da cultura agrícola mais relevante para o país e considerando potenciais heterogeneidades entre os biomas em diferentes estágios de ocupação do seu solo.

CONSTRUÇÃO DAS VARIÁVEIS E BASES DE DADOS

Esta seção detalha como as variáveis de interesse, dependentes e de controle foram calculadas para construir a base de dados que subsidia os resultados empíricos deste trabalho. É importante notar, em primeiro lugar, que a base de dados está estruturada como um painel de ano por *grid*, cobrindo um período de vinte anos (1993-2012). O *grid* (9 km × 9 km) escolhido como unidade de análise é a menor agregação possível pela qual a variável de interesse do choque de produtividade da soja transgênica pode ser estimada, segundo os dados disponibilizados pelo Global Agro-Ecological Zones (GAEZ, 2012).⁴ O período escolhido contempla vinte anos, com seis anos de observações pré-tratamento e 14 de observações pós-tratamento. Optou-se pelo intervalo entre 1993 e 2012 por ser um período consideravelmente extenso, seja no pré-tratamento, com seis anos de observações, e ainda mais no pós-tratamento, com 14 anos. No caso do pós-tratamento, optou-se por um período ainda mais extenso para que potenciais *delays* nos efeitos pudessem ser captados. Mais anos poderiam ser adicionados à amostra, mas isso dificultaria ainda mais o processamento dos dados e pouco acrescentaria ao *timing* do tratamento, além de eventualmente trazer para a amostra outros episódios que poderiam sujar o resultado.

⁴ Disponível em: <https://www.gaez.iiasa.ac.at>. Acesso em: 27 out. 2022.

Variável de interesse: dimensão *cross-section* e temporal

Para identificar os efeitos da introdução da soja transgênica no uso do solo no Brasil, é preciso primeiramente construir uma variável de interesse exógena capaz de representar o impacto da soja transgênica em cada região. Para isso, seguimos uma estratégia de identificação semelhante à utilizada no estudo de Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016), em que a construção da variável de identificação do choque de produtividade se dá a partir da combinação de duas variáveis de diferentes dimensões: uma variável *cross-section* do potencial de produção adicional com a introdução da soja transgênica e uma variável de dimensão temporal, considerando o ano em que a semente transgênica da soja passa a ser um fator potencial para a produção agrícola.

No corte *cross-section*, seguindo inteiramente a proposição de Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016), foi utilizada a base GAEZ/FAO v3.0, que fornece o potencial de produtividade por hectare a partir da utilização de diferentes níveis de insumo. Esses dados foram estimados e georreferenciados em zonas que consistem em *grids* de 9 km × 9 km, utilizando diversos dados primários para o período entre 1960 e 1990. Dessa forma, para cada *grid/pixel*, a base georreferenciada informa o potencial de produtividade da soja em toneladas por hectare a partir da utilização de *low-level inputs (traditional crops)*⁵

⁵ “Sob a suposição de manejo tradicional e insumos básicos, o sistema agrícola é basicamente de subsistência e não necessariamente orientado para o mercado. A produção é baseada no uso de ‘variedades cultivadas’ tradicionais (...), técnicas intensas em mão de obra, sem aplicação adicional de nutrientes, sem uso de produtos químicos para controle de pragas e de doenças e com conservação mínima medidas” (BUSTOS; CAPRETTINI; PONTICELLI, 2016, Apêndice p. 20, tradução nossa).

e *high-level inputs (advanced management)*.⁶ Portanto, a partir da diferença do potencial de produtividade entre *low-level inputs* e *high-level inputs*, é possível obter uma *proxy* do choque de produtividade potencial gerado com a introdução de uma nova tecnologia, como as sementes transgênicas da soja.

Tendo a variação *cross-section* dos diferentes ganhos de produtividade com a introdução da nova tecnologia, é preciso definir um corte temporal para estabelecer os períodos pré-tratamento e pós-tratamento, isto é, o ano em que o choque de produtividade realmente se inicia. No contexto da soja transgênica, esse corte não é trivial. Apenas em 2003, com Medida Provisória editada pelo então presidente Luís Inácio Lula da Silva, houve autorização legal para comercialização dos grãos de soja provenientes de sementes transgênicas, sendo que somente em 2005 foi estabelecida uma nova legislação que permitia a comercialização da variante transgênica sem a necessidade de Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/Rima). Sob o argumento legal da Medida Provisória de 2003, Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016) definem esse ano para delimitar o corte temporal. Apesar disso, a estratégia empírica dos autores utiliza a frequência dos censos (agropecuário e demográfico) portanto, para efeito prático, considera-se que 1996 e 2000 são anos pré-tratamento e 2007 e 2010 são anos pós-tratamento.

Porém, a história do plantio de soja transgênica em território nacional data de antes de 2003, sendo de 1997 os primeiros registros

⁶ “Sob a suposição de manejo e utilização de insumos avançados, a produção agrícola é orientada para o mercado. (...) A produção é baseada em ‘variedades’ de alto rendimento, é totalmente mecanizada, com baixa intensidade de mão de obra, e utiliza técnicas avançadas para aplicação de nutrientes, controle de pragas, de doenças e de aplicação ótima de nutrientes e controle de pragas, doenças e parasitas” (BUSTOS; CAPRETTINI; PONTICELLI, 2016, Apêndice p. 20-21, tradução nossa).

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

de sementes de soja transgênica em território nacional, provenientes da Argentina (CASTRO, 2006). Em 1998, há registro das primeiras apreensões de soja transgênica colhida em território nacional, mesmo ano em que a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNbio) dá o primeiro parecer favorável ao plantio com as sementes transgênicas RR⁷ da Monsanto sem a necessidade de EIA/Rima. No entanto, ainda em 1998, uma liminar impedindo essa autorização foi concedida, e o plantio da semente não chegou a ser comercialmente permitido. Apesar disso, algumas estimativas indicam que em 1998 cerca de 6,2% da área plantada de soja no Brasil – principalmente no Sul do país – já era de sementes transgênicas (CIB, 2018), de forma que a maior parte dessa produção era ilegal e seus derivados não eram discriminados no rótulo. As disputas judiciais se prolongaram nos anos seguintes; porém, no campo, a soja transgênica nunca deixou de ser usada: em 2002, estima-se que cerca de 20% da área colhida de soja no país era de sementes transgênicas. Em alguns estados, como no Rio Grande do Sul, estima-se que esse número tenha chegado a 50% em 2003.⁸ Assim, apesar dos principais marcos legais sobre a soja transgênica datarem de 2003 e 2005, considera-se 1998 o ano de introdução da soja transgênica no país (CÉLERES, 2018; CIB, 2018) – inclusive com diversas reportagens de comemoração dos vinte anos dessa data em 2018 (20 ANOS..., 2018).⁹

⁷ A semente transgênica RR (Roundup Ready) torna a planta mais resistente a herbicidas como o glifosato.

⁸ Ver Castro (2006) para o contexto da soja transgênica no período anterior à aprovação de 2003.

⁹ Disponível em: <https://exame.com/brasil/20-anos-depois-da-aprovacao-transgenico-se-torna-regra-no-campo/>. Acesso em: 27 out. 2022.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

Sendo assim, para construção da variável do choque de produtividade, aplica-se o diferencial entre o *high-level input* e o *low-level input* para as observações após 1998, como na equação (1):

$$CP_{it} = \begin{cases} 0 & \text{se } t < 1999 \\ high\ input_i - low\ input_i & \text{se } t \geq 1999 \end{cases} \quad (1),$$

em que, para cada *grid* i em cada ano t , a variável de choque de produtividade da soja (CP_{it}) assume o valor zero se a observação for anterior a 1999 e assume o valor equivalente à diferença entre *high input_i* e *low input_i* se a observação for a partir de 1999.

Além disso, é importante que variáveis de controle também possam ser adicionadas à base para capturar potenciais vieses na inferência desejada. Porém, como o estudo se baseia em uma unidade de análise consideravelmente desagregada e pouco convencional (*grids* da GAEZ/FAO v3.0) e ainda com observações durante vinte anos, para adicionar controles é preciso que essas variáveis sejam georreferenciadas e tenham uma extensa série histórica desse georreferenciamento. Portanto, apenas dois grupos de variáveis puderam ser adicionadas. Primeiramente, a partir das estimativas de Matsuura e Willmott (2018) e da aplicação dessa base realizada por Costa, Sant’Anna e Young (2021), foi possível extrapolar¹⁰ as médias e desvios em relação à média histórica de temperatura e precipitação para cada *grid* a partir das observações meteorológicas mais próximas. Por fim, dada a importância das áreas protegidas em conservar florestas e restringir tipos de usos do solo (GANDOUR, 2018; NOLTE *et al.*, 2013), a partir do *shapefile*

¹⁰ Extrapolação feita a partir dos vizinhos mais próximos entre os *grids* e os pontos das estimativas de Matsuura e Willmott (2018).

disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, [2007]),¹¹ também foi possível criar uma série histórica da área (em hectares) em cada *grid* de unidades de conservação de uso sustentável e proteção integral. Idealmente, seria importante também adicionar as áreas protegidas por terras indígenas (TI) à base de dados, dada a sua importância para deter o desmatamento; contudo, o *shapefile* disponível de TIs não informa o ano de criação dessas áreas, dificultando a construção de uma série histórica.

Variáveis dependentes

Para estimar os efeitos do potencial de produtividade da soja transgênica é crucial que se avalie as áreas de cada uso do solo de interesse para o estudo. A contribuição do MapBiomias 6 representa uma inovação disruptiva nesse sentido, uma vez que permite acompanhar a evolução de mais de vinte categorias do uso do solo de 1985 até os dias atuais, em uma resolução consideravelmente alta (pixel de 30 × 30 m).¹² Para este estudo, as 24 categorias foram agregadas em nove grupos de interesse, conforme o quadro 1.

As categorizações propostas seguem em boa parte as agregações em diferentes níveis do MapBiomias 6, em que as categorias 3, 4, 5 e 49 são formações naturais florestais (Florestas); 11, 12, 32, 29 e 13 são formações naturais não florestais (FNMF); 23, 24, 30, 25 são áreas não vegeta-

¹¹ Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Acesso em: 27 out. 2022.

¹² Os *rasters* georreferenciados do uso do solo brasileiro da Coleção 6 do MapBiomias podem ser baixados a partir das instruções disponíveis em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=p-t-BR. Acesso em: 27 out. 2022.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

das (ANV); e 33 e 31 são corpos hídricos (Água). As exceções criadas são: a agregação de agriculturas perenes (café e citrus) com floresta plantada (FP + AgPerene); a agregação que será feita em alguns casos com pastagem e mosaico agropecuário (Pasto); e a desagregação de agriculturas temporárias em Soja, Cana e outras agriculturas temporárias (AgTemp).

Quadro 1. Categorias de uso do solo agregados a partir do MapBiomias 6

Uso do solo Agregado	Categoria do MapBiomias 6
Florestas	Formação florestal (3); formação savânica (4); mangue (5); restinga arborizada (49)
FP + AgPerene	Floresta plantada (9); café (46); citrus (47)
FNNF	Campo alagado e área pantanosa (11); formação campestre (12); apicum (32); afloramento rochoso (29); outras FNNF (13)
Pasto (+ Mosaico)	Pastagem (15); mosaico de agricultura e pastagem (21)
Soja	Soja (39)
Cana	Cana-de-açúcar (20)
AgTemp	Arroz (40); outras lavouras temporárias (41)
ANV	Praia e duna (23); infraestrutura urbana (24); mineração (30); outras ANV (25)
Água	Aquicultura (31); rio, lago e oceano (33)

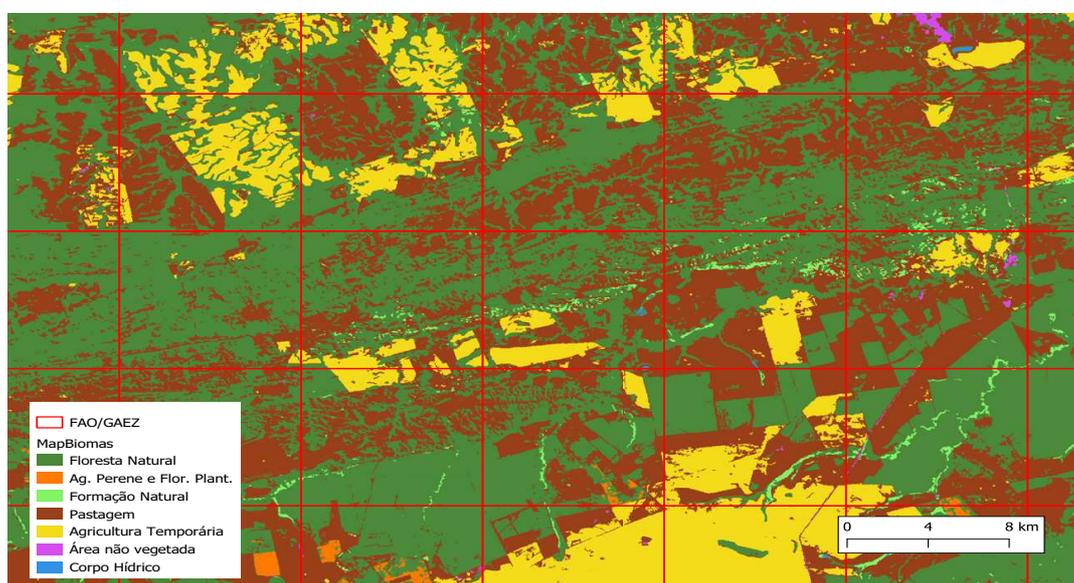
Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomias (2021).

Por fim, é importante destacar que, para a compatibilização dos dados do MapBiomias 6 com os *grids* da base GAEZ/FAO v3.0, foi necessário realizar uma estatística por zona de cada uso agregado do MapBiomias 6 a partir de uma máscara de identificação na qual cada *grid* da base GAEZ/FAO corresponde a uma unidade de análise. Dessa forma, para cada pixel de 9 km × 9 km da GAEZ/FAO foram somadas as áreas de cada cobertura para cada ano, e o mesmo vale para as áreas

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

de unidades de conservação (UC).¹³ Na figura 1 é possível visualizar um exemplo, em que os *grids* vermelhos correspondem a cada unidade de análise (ou cada *grid* da base GAEZ/FAO) que tiveram a área de cada cobertura em seu interior somadas.

Figura 1. Exemplo da sobreposição entre a máscara da base da GAEZ/FAO e MapBiomas 6



Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomas (2021) e GAEZ (2012).

ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS E MATRIZ DE TRANSIÇÃO

Expostas as principais variáveis utilizadas neste estudo, serão apresentadas nesta seção algumas estatísticas descritivas. Na tabela 1 é possível

¹³ Para a realização do geoprocessamento dessas contas, foi utilizado o *software* Dinamica EGO, suas calculadoras de *raster* e os *functores* de estatística por zona.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

identificar três quadros contendo as estatísticas para os três biomas de interesse, bem como as estatísticas pré e pós-tratamento.

Tabela 1. Estatísticas descritivas das principais variáveis utilizadas

	Pré-tratamento				Pós-tratamento			
	Média	Máx.	Mín.	Desvio	Média	Máx.	Mín.	Desvio
Mata Atlântica								
Floresta	2457,56	8636,82	0	2054,89	2455,68	8638,98	0	2014,04
FNNF	280,15	8364,98	0	914,17	270,53	8369,38	0	860,38
Soja	237,45	6752,52	0	809,29	521,12	7647,16	0	1306,61
Cana	106,23	7223,3	0	552,08	202,45	7316,88	0	749,68
Pasto	3095,19	8583,43	0	2472,95	2831,89	8519,33	0	2379,96
Mosaico	1255,17	6542,43	0	866,18	1369,02	6505,04	0	885,14
AgTemp	685,97	6902,91	0	1148,59	377,24	6647,88	0	686,07
Arroz (AgTemp)	6,82	4974,65	0	108,93	13,17	5817,51	0	168,56
Café (AgPer)	12,6	2901,48	0	71,36	20,97	2673,14	0	104,39
Citrus (AgPer)	0,56	1209,19	0	13,23	1,36	2222,94	0	25,9
FP	114,96	7186,09	0	463,44	165,83	6880,17	0	532,03
UC (PI)	117,36	8623,61	0	787,37	164,21	8623,61	0	905,96
UC (US)	318,48	8665,85	0	1399,25	489,26	8665,85	0	1707,61
Precipit	1465,9	3209,5	167	482,98	1458,91	3578	263,1	389,98
Temp	20,78	27,6	11	3,02	20,97	27,8	10,6	2,89
CP_soja	0	0	0	0	1,85	3,94	0	0,97
CP_milho	0	0	0	0	1,06	8,72	-0,12	1,81
CP_algodão	0	0	0	0	0,17	1,05	-0,07	0,2
Cerrado								
Floresta	4378,41	8638,98	0	2537,64	4046,68	8638,98	0	2480,33
FNNF	904,78	8611,11	0	1619,86	858,18	8611,11	0	1570,85
Soja	143,41	8329,83	0	629,58	378,99	8564,19	0	1116,59
Cana	63,23	7796,03	0	508,17	103,14	7846,19	0	623,72
Pasto	2206,82	8227,8	0	2208,38	2324,59	8361,92	0	2220,33
Mosaico	540,54	6655,7	0	674,3	528,26	6645,36	0	677,82
AgTemp	188,44	8528,86	0	599,43	156,82	8107,43	0	472,72

(Continua)

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

(Continuação)

	Pré-tratamento				Pós-tratamento			
	Média	Máx.	Mín.	Desvio	Média	Máx.	Mín.	Desvio
Cerrado								
Arroz (AgTemp)	0,54	3702,18	0	27,72	1,05	5160,91	0	41,74
Café (AgPer)	4,15	1595,38	0	29,8	7,77	3062,03	0	62,99
Citrus (AgPer)	1,69	2906,51	0	43,14	3,77	4340,8	0	70,23
FP	49,5	6876,22	0	324,64	63,16	6894,55	0	372,53
UC (PI)	87,09	8647,83	0	765,28	204,06	8647,83	0	1169,15
UC (US)	166,2	8665,85	0	1096,28	378,22	8665,85	0	1623,68
Precipit	1362,43	2565,7	272,8	325,37	1444,47	2645,3	317,1	323,44
Temp	23,99	29,2	16,2	1,91	24,17	29,2	15,9	1,93
CP_soja	0	0	0	0	2,04	3,65	-0,54	0,72
CP_milho	0	0	0	0	1,08	8,3	-1,88	1,72
CP_algodão	0	0	0	0	0,19	1,11	-0,19	0,22
Amazônia								
Floresta	7336,97	8638,98	0	2057,25	6975,19	8638,98	0	2362
FNNF	322,14	8620,73	0	1125,07	325,54	8608,42	0	1138,62
Soja	1,83	7164,42	0	63,54	23,32	8397,7	0	263,65
Cana	0,15	2237,86	0	11,4	1,01	4364,8	0	42,46
Pasto	646,00	8514,39	0	1472,15	981,98	8578,75	0	1912,48
Mosaico	1,92	1803,94	0	31,2	1,04	2286,32	0	18,75
AgTemp	4	5268,88	0	65,14	11,04	3701,1	0	92,73
Arroz (AgTemp)	0	0	0	0	0	0	0	0
Café (AgPer)	0	0	0	0	0	0	0	0
Citrus (AgPer)	0	0	0	0	0	0	0	0
FP	2,93	6982,92	0	81,93	4,77	7103,29	0	110,25
UC (PI)	339,77	8647,83	0	1592,02	616,68	8647,83	0	2111,5
UC (US)	393,69	8665,85	0	1685,52	1082,92	8665,85	0	2693,01
Precipit	2145,22	5293,6	421,7	511,43	2285,61	4702,4	625,9	520,39
Temp	26,12	29,5	16,3	1,23	26,27	30,8	16,4	1,19
CP_soja	0	0	0	0	1,56	3,1	0	0,52
CP_milho	0	0	0	0	0,74	6,62	0	1,11
CP_algodão	0	0	0	0	0,04	0,79	-0,06	0,09

Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomass (2021), GAEZ (2012), Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, [2007]) e Matsuura e Willmott (2018).

As estatísticas descritivas dos *grids* dos três principais biomas brasileiros apresentadas na tabela 1 foram separadas para os seis anos pré-tratamento (1993 até 1998) e para os 14 anos pós-tratamento (1999 até 2012). O primeiro grupo de variáveis (em hectares) corresponde aos principais usos do solo agregados (indo do uso *Florestas* até *FP*);¹⁴ o segundo grupo consiste nas áreas de UC, divididas em “proteção integral” e “uso sustentável” (também medidas em hectare); o terceiro grupo corresponde às duas variáveis meteorológicas, com médias anuais de precipitação (mm/ano) e mensais de temperatura (°C); por fim, o último grupo consiste nas variáveis de “choque de produtividade potencial” (tonelada/ano), em que *CP_Soja* é a variável de interesse deste estudo, enquanto *CP_Milho* e *CP_Algodão* são controles criados a partir da mesma metodologia de *CP_Soja*, isto é, a diferença entre *low-level input* e *high-level input* das respectivas culturas.

Uma análise breve das estatísticas descritivas da tabela 1 permite dois tipos de comparação: entre os biomas e entre os períodos pré e pós-tratamento. Entre os biomas, é possível observar como a Amazônia preserva, em média das áreas dos seus *grids*, uma área muito maior de vegetação natural (*Florestas* + *FNNF*) que o Cerrado, que, por sua vez, também preserva consideravelmente mais que a Mata Atlântica. Em contrapartida, um *grid* médio da Mata Atlântica concentra em sua maioria *Pasto* (e *Mosaico* agropecuário) e, em menor escala, agriculturas temporárias, sendo o bioma que mais apresenta esses usos, seguido pelo Cerrado e muito à frente da Amazônia.

¹⁴ As estatísticas descritivas das variáveis de uso do solo estão em hectare para facilitar a interpretação dos valores; porém, para a estimação dos coeficientes a partir das regressões propostas na seção a seguir utilizou-se o logaritmo natural dessas variáveis, acrescentando em uma unidade os seus valores a fim de evitar erro nas observações que fossem iguais a zero.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

Em termos de evolução, é importante notar que as áreas de vegetação natural diminuem consideravelmente no pós-tratamento na Amazônia e no Cerrado e quase não se alteram na Mata Atlântica, dado que os usos naturais se encontram muito mais saturados nesse bioma (CALABONI *et al.*, 2018; WALKER, 2012). Dos usos antrópicos, é importante notar que o *Pasto* se expande consideravelmente na Amazônia, mais timidamente no Cerrado e encolhe na Mata Atlântica. Esse encolhimento está provavelmente relacionado à expansão das áreas de *Soja*, *Cana* e de outras agriculturas que, em geral, são mais rentáveis e que também se expandiram no Cerrado e na Amazônia. Por fim, considerando o choque de produtividade potencial da soja – que, intuitivamente, é zero antes do tratamento em todas as observações –, é importante compreender que, na média, ele parece ter sido mais intenso no Cerrado, seguido primeiro pela Mata Atlântica e depois pela Amazônia.

Matrizes de transição

As estatísticas descritivas dos usos do solo apresentadas ajudam a entender a ordem de grandeza desses usos em cada bioma e dão uma noção inicial de quais deles se expandiram ou se reduziram no período proposto. No entanto, as transições de uso do solo podem ter caráter dinâmico: uma floresta convertida em pasto pode dar lugar, anos depois, a outra agricultura temporária, como a soja, ao invés de ser diretamente convertida em soja. Portanto, é possível que o choque de produtividade da soja transgênica tenha efeitos positivos não só na área desse cultivo, mas também na área de usos do solo que possam

servir como intermediários para a soja – principalmente nas regiões de fronteira do desmatamento, onde muitas vezes a ocupação por pasto serve como um meio de consolidar o desmatamento (ALVARENGA JUNIOR, 2014). Sendo assim, esta subseção visa identificar se existem usos intermediários para a soja, isto é, usos antrópicos que antecedem a soja e qual seria a magnitude deles em cada bioma.

Algebricamente, parte-se da base de dados do MapBiomas (2021)¹⁵ para a construção de uma matriz de transição direta entre t_0 e t_2 chamada $MTD_{t_0}^{t_2}$. Essa é uma matriz quadrada de dimensão n (equivalente ao número de usos do solo), em que as linhas representam os usos de origem (em t_0), e as colunas os usos de destino (em t_2). Como características, é importante notar que os elementos da diagonal principal dessa matriz representam a área dos usos que não se alteraram; a soma de suas linhas equivale à área daquele uso em t_0 , do mesmo modo que a soma de determinada coluna representa a área daquele uso em t_2 ; e a soma de todos os elementos dessa matriz equivale à área total da região. Para obter uma matriz de transição direta líquida $MTDL_{t_0}^{t_2}$, na qual os elementos representam o saldo das transições entre t_0 e t_2 , pode-se subtrair de $MTD_{t_0}^{t_2}$ a sua transposta ($MTDL_{t_0}^{t_2} = MTD_{t_0}^{t_2} - MTD_{t_2}^{t_0}$). Essa nova matriz $MTDL_{t_0}^{t_2}$ tem os elementos de sua diagonal principal sempre iguais a zero, enquanto os elementos opostos (por exemplo, elemento $i = 1$ e $j = 3$ versus elemento $i = 3$ e $j = 1$) têm sempre o mesmo valor com sinais opostos; a soma de todos os elementos dessa matriz equivale a zero. A partir de $MTDL_{t_0}^{t_2}$ é possível descobrir se os usos têm saldo positivo ou negativo com os demais.

¹⁵ Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Estat%C3%ADsticas/Cole%C3%A7%C3%A3o%206/1-ESTATISTICAS_MapBiomas_COL6.0_UF-BIOMAS_v12_SITE.xlsx. Acesso em: 27 out. 2022.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

Porém, com base nessa matriz ainda não é possível saber se uma transição que ocorreu entre $t0$ e $t2$ se deu por meio de um uso do solo intermediário em $t1$. Para isso, é possível construir uma matriz de transições intermediárias líquidas a partir da soma de matrizes intermediárias e da subtração de suas transpostas, conforme a equação (2):

$$MTIL_{t_0}^{t_2} = [(MTD_{t_0}^{t_1} + MTD_{t_1}^{t_2}) - (MTD_{t_1}^{t_0} + MTD_{t_2}^{t_1})], \text{ onde } MTIL_{t_0}^{t_2} = MTTL_{t_0}^{t_2} - MTDI_{t_0}^{t_2} \quad (2).$$

Neste caso, $MTTL_{t_0}^{t_2}$ é a matriz de transições totais líquidas, que soma todas as transições – diretas e intermediárias – que ocorrem nas duas janelas temporais (de $t0$ para $t1$ e de $t1$ para $t2$). Sendo assim, nessa operação ainda estão somadas as áreas de transição diretas (por exemplo, se determinada área manteve o uso de $t0$ para $t1$ e só transitou de $t1$ para $t2$, então o elemento dessa transição ainda está sendo considerado). Portanto, para o cálculo de $MTIL_{t_0}^{t_2}$, subtrai-se de $MTTL_{t_0}^{t_2}$ a matriz de transição líquida direta $BDI_{t_0}^{t_2}$. Dessa forma, os elementos da matriz $MTIL_{t_0}^{t_2}$ só consideram as transições que de fato ocorreram intermediariamente entre $t0$ e $t2$. No caso de duas janelas temporais, bastaria considerar as transições líquidas de $t1$ para $t2$; mas em períodos mais longos, com mais janelas para transições intermediárias, essa operação é mais eficiente.

Seguindo essa metodologia para identificação de possíveis usos intermediários da soja, as próximas subseções apresentarão brevemente as matrizes de transição total líquida e intermediária líquida para os três biomas de interesse. Nas tabelas 2, 3 e 4 é possível identificar tanto os elementos da matriz $MTTL_{t_0}^{t_2}$ (valores numéricos em preto) quanto os valores que correspondem à matriz $MTIL_{t_0}^{t_2}$ (valores abaixo

dos valores em preto, que são azuis para saldos positivos e vermelho para saldos negativos). O período considerado para esse exercício vai de 1990 até 2020, dado que as transições por bioma já são disponibilizadas pelo MapBiomas 6 e são processadas mais facilmente, e a janela considerada para transições intermediárias é de cinco em cinco anos. Para facilitar a apresentação das matrizes, algumas colunas (categorias de destino das transições) que não são de interesse deste estudo foram ocultadas. A unidade de todos os elementos das matrizes é o hectare.

Mata Atlântica: transições em uma região consolidada

A Mata Atlântica, presente em quase todo o litoral brasileiro, é o bioma que abriga as maiores concentrações populacionais do país e sofre da consolidação de florestas primárias por áreas antropizadas desde a ocupação do território brasileiro por colonizadores europeus. Sendo assim, como já pode ser observado nas estatísticas descritivas da tabela 1, dos três maiores biomas, é o que conta com a menor taxa de Florestas, além de ter a maior concentração dos usos antrópicos *Soja*, *Cana*, *AgTemp*, *Pasto* e *Mosaico*. Portanto, espera-se que a análise das matrizes MTTL e MTIL desse bioma para os usos agropecuários reflita o estágio avançado da ocupação nessa região.

A título de exemplo, considerando a transição *AgTemp* → *Soja* na tabela 2 e a janela de cinco em cinco anos entre 1990 e 2020, é possível notar que o saldo das transições totais líquidas é de 3,99 milhões de hectares e, desse montante, 633 mil hectares foram transições intermediárias líquidas (isto é, que não eram *AgTemp* em 1990, mas se tornaram *AgTemp* entre 1995 e 2015, antes da *Soja* observada em 2020).

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

Assim, a partir dessa tabela, é possível identificar importantes características dos outros usos do solo com a *Soja*. Dos usos com transições mais significativas, a *Soja* parece ser uma recebedora líquida de todos – em que se destacam *AgTemp*, *Pasto* e *Mosaico*. Porém, esses dois últimos parecem ter seus saldos positivos de doadores intermediários para *Soja*. Desse modo, na Mata Atlântica, apesar de *Pasto* ter cedido uma grande área para *Soja* no período, a MTIL sugere que essas áreas que eram *Pasto* em 1990 e viraram *Soja* em 2020 tiveram algum uso intermediário. Analisando a linha do uso *Pasto*, é possível observar que esse uso é um doador intermediário líquido apenas para *Mosaico*, enquanto o próprio *Mosaico* parece ser um doador intermediário líquido para *AgTemp*.

Tabela 2. MTTL e MTIL de usos agropecuários na Mata Atlântica, 1990-2020

Transição líquida das matrizes intermediárias de cinco em cinco anos					
	AgTemp	Cana	Mosaico	Pasto	Soja
AgTemp	0	414.114	74.443	154.007	3.996.671
	0	-47.541	-864.766	372.360	633.080
Água	-16.926	-1.424	58.973	-85.089	-974
	-3.146	-442	19.505	-2.166	-449
ANV	-75.881	-24.222	-317.887	-249.597	-16.129
	-5.331	4.204	-69.376	38.452	-3.697
Cana	-414.114	0	-1,804.187	-1.784.774	-1.913
	47.541	0	-1.030.220	957.884	-17.227
Floresta	-85.004	15.113	-1.003.796	-375.071	69.201
	-482	-33.695	-353.908	455.342	-303.061
FNNF	29.884	-491	138.153	-10.073	74.145
	16.723	-799	76.393	11.576	-108.885
FP+AgPer	-160.736	-8.234	-736.047	-881.472	-18.652
	85.367	-11.295	-206.144	459.431	-64.106

(Continua)

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

(Continuação)

Transição líquida das matrizes intermediárias de cinco em cinco anos					
	AgTemp	Cana	Mosaico	Pasto	Soja
Mosaico	74.443	1.804.187	0	-7.920.443	1.351.337
	864.766	1.030.220	0	-2.974.882	546.358
Pasto	-154.007	1.784.774	7.920.443	0	1.280.302
	-372.360	-957.884	2.974.882	0	-682.016
Soja	-3.996.671	1.913	-1.351.337	-1.280.302	0
	-633.080	17.227	-546.358	682.016	0

Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomias (2021).

Desse modo, para a Mata Atlântica, merecem destaque algumas trajetórias de transição do uso do solo: *AgTemp* → *Soja*; *Mosaico* → *Soja*; *Mosaico* → *Agtemp* → *Soja*; *Pasto* → *Mosaico* → *Soja*. É importante notar que a conversão líquida de *Floresta* e *FNNF* para *Soja* existe, mas não é tão significativa nesse bioma e não tende a ocorrer de forma direta: no caso de *Floresta*, o principal intermediário para *Soja* seria o *Pasto*, enquanto para *FNNF* o principal intermediário para *Soja* parece ser o *Mosaico*. Por fim, considerando que *Cana* também é um importante uso agrícola na região e que se expandiu consideravelmente nesse período, é importante destacar trajetórias que parecem relevantes: *Mosaico* → *Cana*; *Agtemp* → *Mosaico* → *Cana*; *Pasto* → *Mosaico* → *Cana*. Portanto, no caso da *Cana*, o único uso intermediário que parece ser relevante é o *Mosaico* agropecuário.

Cerrado: a história de uma ocupação heterogênea

O bioma do Cerrado fornece uma regionalização com características heterogêneas: ao mesmo tempo que preenche territórios ocupados e consolidados há muitas décadas, como nos estados de São Paulo

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

e Minas Gerais, também faz parte da Amazônia Legal e do trecho conhecido como “arco do desmatamento” – região na Amazônia Legal que concentra municípios com aceleradas taxas de desmatamento nas últimas décadas. Portanto, espera-se que nesse recorte regional as transições do uso do solo reflitam um contexto intermediário, contendo, simultaneamente, algumas das características que foram observadas para Mata Atlântica e algumas daquelas que serão vistas na próxima subseção da Amazônia.

Primeiramente, seguindo as transições apresentadas na tabela 3, é possível observar que a *Soja* apresentou saldo positivo nas transições totais com todos os usos no período (exceto com *Cana*, para a qual houve um saldo negativo, mas em menor escala). Similarmente à Mata Atlântica, *Soja* no Cerrado recebeu uma quantidade significativa de área de *AgTemp*, *Pasto* e *Mosaico*, em que *AgTemp* e *Mosaico* teriam sido os principais usos intermediários. No entanto, nesse caso, a *Soja* ocupou também áreas significativas de *Floresta* e *FNNF*, apesar dessas transições terem contado com usos intermediários. Considerando os saldos de transição intermediária de *Floresta* e *FNNF*, esses usos intermediários podem ser *AgTemp*, *Mosaico* e *Pasto*.

Tabela 3. MTTL e MTIL de usos agropecuários no Cerrado, 1990-2020

Transição líquida das matrizes intermediárias de cinco em cinco anos					
	AgTemp	Cana	Mosaico	Pasto	Soja
AgTemp	0	492.120	-1.185.334	52.339	4.331.553
	0	9.469	-1.227.608	253.064	2.058.341
Água	-1.478	-52	-15.104	-62.661	-1.503
	-1.046	-56	-6.917	-12.244	-1.446

(Continua)

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

(Continuação)

Transição líquida das matrizes intermediárias de cinco em cinco anos					
	AgTemp	Cana	Mosaico	Pasto	Soja
ANV	63.270	-1.968	-7.280	-44.718	194.646
	78.376	-2.949	33.308	72.657	124.043
Cana	-492.120	0	-1.073.086	-906.970	-208.639
	-9.469	0	-631.776	638.611	-141.574
Floresta	1.231.351	72.447	2.945.936	12.010.831	2.235.581
	550.954	-122.590	926.439	917.945	-2.630.251
FNNF	792.223	10.397	499.852	866.988	1.233.421
	493.057	-13.127	233.438	20.482	-484.365
FP+AgPer	-69.054	-2.447	-573.437	-985.793	-28.561
	-27.923	-6.530	-308.387	227.768	-60.640
Mosaico	1.185.334	1.073.086	0	-3.518.524	2.893.045
	1.227.608	631.776	0	-2.188.456	1.206.952
Pasto	-52.339	906.970	3.518.524	0	4.567.823
	-253.064	-638.611	2.188.456	0	-71.125
Soja	-4.331.553	208.639	-2.893.045	-4.567.823	0
	-2.058.341	141.574	-1.206.952	71.125	0

Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomias (2021).

Portanto, considerando as trajetórias de potencial importância para a *Soja* no Cerrado entre 1990 e 2020, devem ser destacadas: *AgTemp* → *Soja*; *Mosaico* → *Soja*; *Pasto* → *Mosaico* → *Soja*; *Pasto* → *Mosaico* → *Agtemp* → *Soja*; *Floresta (FNNF)* → *AgTemp* → *Soja*; *Floresta (FNNF)* → *Mosaico* → *Soja*; *Floresta (FNNF)* → *Pasto* → *Mosaico* → *Soja*. Além das transições para *Soja*, é importante notar outras características das transições no Cerrado: nesse bioma, a perda de vegetação natural é muito significativa e, por isso, as transições ocorrem principalmente para *Pasto*, mas também para os outros usos agropecuários mencionados. Além disso,

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

o uso *Cana* se expande consideravelmente no período, em especial nas áreas que já estavam consolidadas em 1990, onde o seu principal uso intermediário seria o *Mosaico*.

Amazônia: a expansão da fronteira e uma história repetida

Por fim, o bioma Amazônia se caracteriza como uma região de densa floresta tropical, relevante pela capacidade de armazenamento de carbono e para proteção da biodiversidade e de suma importância para regulação hídrica. Como a região é de difícil acesso – pela própria característica da vegetação e por se concentrar no interior do país, em região de baixa densidade populacional –, as áreas consolidadas em usos antrópicos são proporcionalmente menores. Contudo, nas últimas décadas, o desmatamento na região tem sido acelerado, e a fronteira do desmatamento foi empurrada bioma adentro. Desse modo, espera-se nesse caso um retrato das características de um bioma estritamente na fronteira da ocupação antrópica, em que boa parte da expansão agropecuária se dê em áreas antes não consolidadas.

Na tabela 4, na qual são apresentadas as MTTL e MTIL entre 1990 e 2020 para a Amazônia, é possível identificar uma expansão expressiva da *Soja*, ainda mais se considerado que esse uso do solo era praticamente inexistente no bioma no início da década de 1990, conforme visto na tabela 1. Essa expansão se dá principalmente em áreas de *Pasto*, *Floresta* e *AgTemp*, e desses usos *Soja* tem saldo intermediário positivo apenas para *Pasto* e *AgTemp*. De forma antagônica, é importante notar também que *AgTemp* era um uso pouco expressivo em 1990 na Amazônia e, mesmo assim, parece ser um importante uso intermediário para *Soja*

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

(quase toda a transição *AgTemp* → *Soja* se dá de forma intermediária), enquanto a transição *Floresta* → *Soja*, apesar de muito expressiva, praticamente não acontece de forma direta, mas a partir de usos intermediários – neste caso, o uso intermediário importante sendo *Pasto*.

Tabela 4. MTTL e MTIL de usos agropecuários na Amazônia, 1990-2020

Transição líquida das matrizes intermediárias de cinco em cinco anos					
	AgTemp	Cana	Mosaico	Pasto	Soja
AgTemp	0	17.465	0	-1.036.511	1.268.370
	0	17.304	0	-858.702	1.187.618
Água	651	5	0	-23.791	-163
	-2.322	5	0	-35.417	-269
ANV	-1.330	0		-108.289	-485
	-1.113	0		-29.490	-469
Cana	-17.465	0		-52.936	8.439
	-17.304	0		6.526	8.513
Floresta	793.412	3.051	0	38.079.692	532.310
	332.524	-6.213	0	2.934.578	-3.145.031
FNNF	78.076	15.650	0	714.830	126.029
	18.699	3.958	0	35.569	-21.771
Transição líquida das matrizes intermediárias de cinco em cinco anos					
	AgTemp	Cana	Mosaico	Pasto	Soja
FP+AgPer	-1.602	-15		-164.336	-615
	-1.568	-15		-81.103	-616
Pasto	1.036.511	52.936	0	0	3.242.403
	858.702	-6.526	0	0	1.972.023
Soja	-1.268.370	-8.439	0	-3.242.403	0
	-1.187.618	-8.513	0	-1.972.023	0

Fonte: Elaboração própria a partir de MapBiomias (2021).

As potenciais trajetórias relevantes de transição para a *Soja* na Amazônia são: *Pasto* → *Soja*; *Agtemp* → *Soja*; *Pasto* → *Agtemp* → *Soja*; *Floresta* → *Agtemp* → *Soja*; *Floresta* → *Pasto* → *Soja*. Além da *Soja*, vale destacar a grande expansão de *Pasto* em áreas anteriormente ocupadas por *Floresta*; a expansão de *AgTemp*, que era pouco expressivo em 1990 no bioma, em áreas de *Pasto* e *Floresta* e a cessão de áreas que ocupou entre 1990 e 2020 para *Soja*; e, por fim, a tímida expansão de *Cana*, que continua sendo um uso agrícola pouco relevante no bioma.

ESTRATÉGIA EMPÍRICA

Na segunda seção deste artigo, a partir da revisão da literatura, foi destacada a importância de ganhos de produtividade e da intensificação da agropecuária para o chamado *land sparing*. Por outro lado, outros estudos ponderam que esse mecanismo necessita de uma série de requisitos e não é necessariamente um caminho automático. Na quarta seção foi possível observar de forma preliminar como as transições para o uso do solo da soja se deram em cada bioma brasileiro e como, a princípio, não parece haver uma trajetória consistente na direção de uma transição florestal. As narrativas baseadas na teoria ou nas estatísticas descritivas são relevantes para subsidiar a interpretação do cenário brasileiro recente, mas não permitem a atribuição de causalidade, no sentido de identificar que choques de produtividade realmente foram/são ou não foram/não são capazes de reduzir a ocupação agropecuária. De fato, choques de produtividade (e de demanda) por soja e cana-de-açúcar, por exemplo, ocorreram nesses últimos trinta anos,

bem como a expansão das suas áreas cultivadas. Porém, para avaliar na prática se ganhos de produtividade foram capazes de “poupar terra”, é importante que se construa um contrafactual, buscando observar se a existência de determinado choque de produtividade seria capaz de evitar um cenário ainda mais grave em termos de ocupação da terra.

Portanto, o objetivo principal deste artigo consiste em partir da contribuição metodológica de Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016) para identificar como o choque de produtividade da soja – atrelado à inovação da semente transgênica – afetou os diferentes usos do solo em três biomas brasileiros. Diferentemente deste trabalho, Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016) se aprofundam em potenciais transformações estruturais na indústria a partir dos efeitos heterogêneos da introdução da soja transgênica em diferentes municípios.¹⁶ Porém, a partir da contribuição metodológica de como se estimar exogenamente o choque de produtividade gerado pela introdução da soja transgênica, busca-se neste artigo extrapolar a contribuição de Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016) para identificar efeitos sobre mudanças nos diferentes usos do solo gerados pela introdução da soja transgênica.

Para isso, a estratégia empírica adotada consiste em um modelo de diferenças-em-diferenças com observações anuais e efeito fixo nas duas dimensões. A unidade de análise *i* é o *grid* da GAEZ/FAO, na qual as variáveis de *high-level input* e *low-level input* são disponibilizadas. Em relação à aplicação de Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016) e de os outros trabalhos apresentados que buscam identificar os efeitos de

¹⁶ Vale destacar o trabalho de Dias, Rocha e Soares (2019), que utiliza estratégia empírica semelhante para identificar os efeitos da utilização de glifosato em *outcomes* de saúde.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

choque de produtividade no desmatamento, este estudo parte de um detalhamento na base de dados ainda maior por conseguir utilizar a menor unidade de análise possível (*grid* em vez de municípios) e observações anuais (em vez de observações decenais, a partir dos censos agropecuários e demográficos). Esse avanço só foi possível pela contribuição da base de dados georreferenciada anualmente disponibilizada pelo MapBiomas 6 e pelo processamento desses dados anuais, que foram agregados em uma unidade de análise pequena como os *grids* de 9 km por 9 km. O modelo empírico genérico utilizado pode ser observado na equação (3):

$$Cobertura_{it} = \alpha + \beta * (high_i - low_i) * pós\ 1998_t + \sum_{n=1}[\rho_n * X_{itn}] + \lambda_t + \mu_i + \varepsilon \quad (3),$$

em que i é a unidade de análise do *grid* de 9 km por 9 km e t é o ano. A variável dependente genérica $Cobertura_{it}$ pode assumir a área¹⁷ de qualquer uso do solo em cada *grid* i e ano t . Por sua vez, o coeficiente de interesse β mede o potencial de produtividade gerado pelo choque da semente transgênica da soja nos diferentes usos do solo. Como visto na terceira seção, essa variável independente consiste na interação da diferença entre o *high-level input* e *low-level input* da produtividade da soja (em toneladas por hectare) com uma *dummy* para os anos após 1998. O coeficiente ρ_n capta os efeitos dos n controles, que consistem nas variáveis meteorológicas – precipitação e temperatura anual e por *grid* – nas áreas das UC (discriminadas por uso sustentável e proteção integral) em cada *grid* i e ano t . Posteriormente, foram incluídas também variáveis que buscam captar tendências específicas de unidades da Federação (UF) e

¹⁷ Os resultados apresentados utilizam o logaritmo natural da área mais um (a fim de evitar logaritmo de zero).

controles adicionais que representam potenciais choques de produtividade das sementes transgênicas de milho e de algodão, calculadas nos mesmos moldes da variável de interesse do choque de produtividade da soja transgênica – exceto pelo *timing*, uma vez que o milho foi introduzido em 2006 e o algodão em 2008 (CÉLERES, 2018; CIB, 2018).

Esse modelo genérico foi replicado separadamente para os três principais biomas brasileiros em termos de área: Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, uma vez que, como visto na quarta seção, o estágio de ocupação do uso do solo nesses biomas não caminha conjuntamente, de modo que é importante destacar potenciais heterogeneidades do efeito da soja transgênica tendo em vista os diferentes níveis de consolidação dessas áreas.¹⁸ A fim de tentar corrigir correlações nos erros-padrão dos coeficientes estimados, foi adicionado ao modelo a correção dos erros-padrão a partir de um *two-way cluster* na unidade de análise *i* e no nível UF-ano¹⁹ – uma correção que busca ser mais restritiva do que um *cluster* apenas em *i*.

A estratégia empírica adotada na inferência dos efeitos do choque de produtividade da soja transgênica nos diferentes usos do solo assume, por hipótese, que o efeito provocado por esse choque só seja percebido – isto é, seja estatisticamente diferente de zero – após o ano em que o tratamento se inicia. Isso acontece porque, se há um efeito pré-tratamento da variável que mede o choque de produtividade da soja, então o resultado encontrado após o tratamento tende a refletir

¹⁸ Inicialmente, o modelo também foi reproduzido para o Brasil inteiro, mas a interpretação dos resultados de regiões com características tão distintas não é tão clara, de modo que optou-se pela apresentação por biomas.

¹⁹ Um *cluster* para cada *grid* que está no mesmo UF e no mesmo ano.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

uma tendência existente previamente. Portanto, em uma estratégia empírica na qual o *timing* da variável de interesse é fundamental, é extremamente relevante que se realize algum teste de robustez para avaliar a existência de tendência pré-tratamento. Para isso, também serão apresentados *event studies* a fim de verificar a existência ou não de tendência pré-tratamento. Esses *event studies* seguem a especificação na equação (4):

$$C_{it} = \alpha + \sum_{t=1993}^{1997} [\beta_t * (high_i - low_i)] + \sum_{t=1999}^{2012} [\beta_t * (high_i - low_i)] + \rho * X_{it} + \lambda_t + \mu_i + \varepsilon(4).$$

Nesse caso, é calculado um coeficiente β para cada ano t , exceto para 1998, último ano pré-tratamento, que se optou por omitir para melhor compreensão dos gráficos. Esse coeficiente β visa captar se há efeito de ganho de produtividade no pré-tratamento (a partir dos coeficientes encontrados no primeiro somatório) e no pós-tratamento (nos coeficientes calculados no segundo somatório). Se os coeficientes pré-tratamento são estatisticamente não significativos, isso quer dizer que não há um efeito da variável de interesse antes do próprio tratamento, o que é desejável em um modelo de diferenças-em-diferenças. Nesse modelo também foram incluídos os controles meteorológicos, de área de UC, efeitos fixos e controle por tendência de UF e também o *two-way cluster* por *grid* e por UF-ano para correção dos erros-padrão.

O grande detalhamento da base de dados construída contribui para a análise ao captar da melhor forma possível a oscilação das variáveis utilizadas, e permitir uma estimação mais precisa do coeficiente do choque de produtividade na área dos diferentes usos do solo. Contudo, o tamanho dessa base de dados e a dimensão espacial e temporal das observações dificulta a inclusão de outras variáveis de controle e

estratégias empíricas, assim como testes de robustez que exijam um poder computacional maior, como a inclusão de modelos espaciais que busquem identificar também efeitos indiretos da soja transgênica no uso do solo. De todo modo, ao partir de uma estratégia de identificação exógena e consolidada na literatura por Bustos, Caprettini e Ponticelli (2016), com as observações detalhadas no nível de *pixel* dos dados da FAO/GAEZ e com a inclusão de controles adicionais e a busca em considerar potenciais efeitos heterogêneos entre os biomas, acredita-se que a estratégia empírica proposta e aplicada neste artigo seja válida para a recuperação dos efeitos propostos. Portanto, os resultados que seguem a partir das proposições desta seção estabelecem uma contribuição relevante para a discussão dos efeitos diretos no uso do solo de choques de produtividade e para o diálogo sobre a existência de uma tendência de transição florestal no Brasil ou da prevalência de um paradoxo de Jevons da terra no Brasil.

RESULTADOS PRINCIPAIS

Nesta seção, primeiramente serão apresentados os coeficientes dos resultados principais da Amazônia (tabela 5), do Cerrado (tabela 6) e da Mata Atlântica (tabela 7). Essas três tabelas apresentam três painéis distintos contendo: (A) os controles meteorológicos (precipitação e temperatura) e área de UC; (B) os controles de A e uma variável de tendência linear por UF; (C) os controles de A, tendência de UF e controles adicionais para choque de produtividade potencial de algodão e milho transgênicos. Todos os testes realizados incluíram também efei-

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

tos fixos em t e i , além do *two-way cluster* em i e UF-ano para correção de erros-padrão.

Primeiramente, a tabela 5 apresenta os efeitos do choque de produtividade da soja (em toneladas por hectare) para a área de cada uso do solo (em %) da Amazônia. Seguindo a especificação do painel A, alguns resultados merecem destaque: a coluna (1) sugere que o aumento de uma tonelada por hectare provocado pelo choque da soja transgênica no *grid i* gerou um aumento de, em média, 36,4% na área de soja. O efeito direto do choque de produtividade da soja transgênica no aumento da área de *Soja* era provavelmente o resultado mais esperado. No mesmo sentido, o choque de uma tonelada por hectare provocado pela soja transgênica também parece ter expandido, em média, a área de *Pasto (+ Mosaico)* e *AgTemp* em 27,6% e 24,5%, respectivamente. Esse resultado, a princípio, pode parecer menos óbvio; contudo, levando em conta o aprendizado a partir das matrizes de transição expostas na quarta seção, é possível que o choque da soja transgênica tenha incentivado a ocupação das áreas com maior potencial, seja com *Pasto* ou com outras culturas, dado que a consolidação na Amazônia, em geral, parece ocorrer por meio desses usos.

Tabela 5. Diferenças-em-diferenças do CP da soja nos usos do solo da Amazônia, 1993-2012

Variáveis	(1) Soja (%)	(2) Floresta (%)	(3) FNNF (%)	(4) Pasto (%)	(5) AgTemp (%)	(6) Cana (%)	(7) FP e AgPerene (%)
Painel A: Controles meteorológicos e de UC e <i>two-way cluster</i> por <i>grid</i> de UF-ano							
Choque produtividade soja (t/ha)	0,364*** (0,085)	-0,057*** (0,009)	-0,002 (0,007)	0,277*** (0,053)	0,246*** (0,058)	0,003* (0,002)	-0,001 (0,002)

(Continua)

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

(Continuação)

Variáveis	(1) Soja (%)	(2) Floresta (%)	(3) FNNF (%)	(4) Pasto (%)	(5) AgTemp (%)	(6) Cana (%)	(7) FP e AgPerene (%)
Painel A: Controles meteorológicos e de UC e two-way cluster por grid de UF-ano							
Choque produtividade soja (t/ha)	0,213*** (0,057)	-0,032*** (0,004)	0,007 (0,005)	0,122*** (0,033)	0,132*** (0,037)	-0,003** (0,001)	0,002 (0,002)
Painel C: Controlando por tendência de UF e potenciais choques com cluster por grid e tendência de UF							
Choque produtividade soja (t/ha)	0,193*** (0,059)	-0,033*** (0,005)	-0,001 (0,005)	0,166*** (0,033)	0,081** (0,039)	-0,003** (0,001)	0,000 (0,002)
Observações	987.640	987.640	987.640	987.640	987.640	987.640	987.640
Efeitos fixos e tendência de UF	S	S	S	S	S	S	S
Cluster	TW	TW	TW	TW	TW	TW	TW
Periodicidade	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual

Fonte: Elaboração própria.

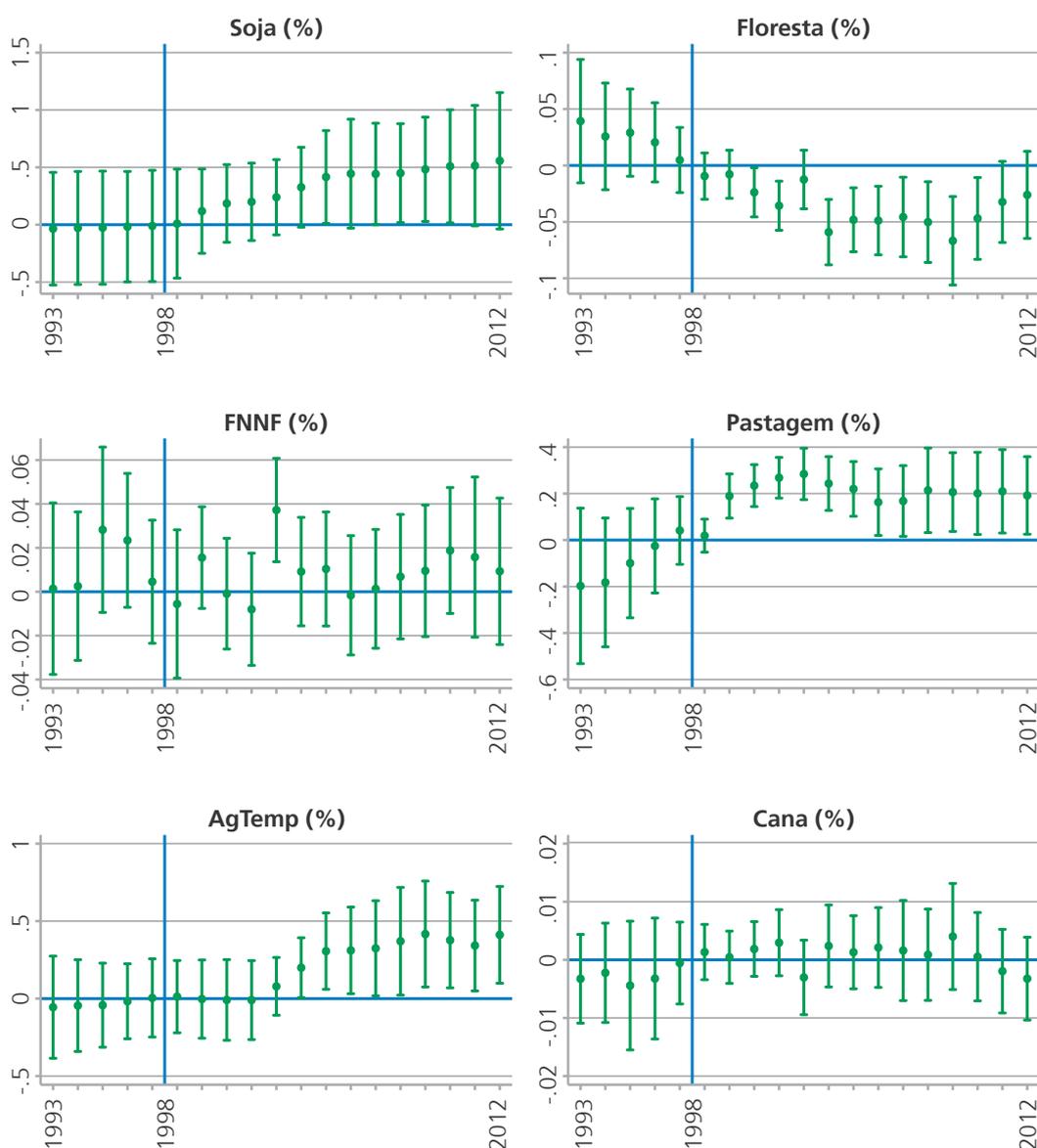
Por outro lado, se esses usos agropecuários do solo observaram aumentos significativos nas suas áreas a partir do choque de produtividade da soja, é importante destacar que, em média, o aumento potencial de uma tonelada por hectare na produção da soja gerado pelo choque da semente transgênica provocou uma redução de 5,7% na área de *Floresta* na Amazônia. A princípio, o coeficiente encontrado é menor, mas vale destacar que ele se aplica a uma área média de *Floresta* por *grid* na Amazônia muito maior do que a área média de outros usos agropecuários (como visto na tabela 1). Ademais, ressalta-se também a importante expansão do pasto como efeito do choque de produtividade da soja, já que esse uso é muito mais relevante em área do que os demais.

Portanto, os resultados encontrados sugerem que o choque de produtividade da soja transgênica gerou no bioma Amazônia a substituição de áreas de *Floresta* por *Soja*, *AgTemp* e, principalmente, *Pasto*, ao contrário do que sugerem os resultados encontrados por Assunção e Bragança (2015) e Szerman e outros (2022). Efeitos significativos para os demais usos não foram encontrados – o que faz sentido, tendo em vista a menor participação desses usos na área total do bioma. Além disso, a adição de controles adicionais nos painéis B e C diminuiu a magnitude dos efeitos estimados do choque de produtividade da soja, mas manteve tanto a significância quanto o sentido dos sinais dos coeficientes de todos os usos do solo – exceto no caso da *Cana*, em que o coeficiente pareceu ganhar significância, embora mantenha magnitude pequena.

Além da significância e direção dos coeficientes encontrados, para o resultado de um modelo de diferenças-em-diferenças ser válido é importante considerar também as tendências pré-tratamento da variável de interesse. Nesse caso, como o tratamento é contínuo, optou-se pela elaboração de um *event study*, conforme apresentado na quinta seção. A partir da figura 2 é possível notar que a tendência pré-tratamento nos usos *Soja*, *Floresta*, *Pasto* e *AgTemp* são estatisticamente iguais a zero, apesar de haver um comportamento declinante e não significativo no caso de *Florestas* e ascendente e não significativo no caso de *Pasto*. Após o tratamento, os efeitos são percebidos (estatisticamente diferentes de zero), mesmo que com alguma defasagem, como é o caso principalmente de *Soja* e *AgTemp*, com defasagens de até cinco anos. Assim como apresentado na tabela 5, não são notados efeitos significativos para *Cana* e *FNNF* na Amazônia.

Não basta ser "tech": o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

Figura 2. *Event study* do efeito do CP da soja nos seis principais usos do solo para a Amazônia



Fonte: Elaboração própria.

Como visto na quarta seção, é importante considerar também que possíveis defasagens no efeito de um choque de produtividade da soja na Amazônia devem ser esperadas, uma vez que a transição para usos

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

como *Soja* e *AgTemp* não é imediata e pode requerer um tempo maior. Dado o choque de produtividade da soja, a resposta aparenta ser mais rápida na diminuição de *Floresta* e no aumento de *Pasto* e mais lenta para o aumento de outros usos, como a própria *Soja* e *AgTemp*. Esse resultado faz sentido em um contexto em que a abertura da fronteira ocorre com transições intermediárias, de *Floresta* para *Pasto* para, só então, outras agriculturas temporárias (*AgTemp*) e, finalmente, para a *Soja*. Observa-se também que parece haver uma diminuição do efeito em *Pasto*, dada a possibilidade de a área destinada a esse uso ter sido ocupada por *Soja* após determinado período.

A tabela 6 apresenta os coeficientes calculados para o Cerrado a partir das mesmas especificações da tabela 5. É importante ressaltar, como foi caracterizado na quarta seção, que esse bioma está situado tanto em regiões da Amazônia Legal – com municípios que fazem parte da fronteira do desmatamento – quanto em regiões consolidadas por usos agropecuários há muitas décadas. Dessa forma, os resultados esperados devem refletir um cenário misto entre Amazônia e Mata Atlântica, no qual a expansão de *Soja* e de outros usos agropecuários a partir do choque de produtividade da soja deve ocorrer majoritariamente sobre usos menos produtivos, embora seja possível também que gere perdas em usos de vegetação natural, como *Floresta* e *FNNE*.

Portanto, a partir dos coeficientes do painel A da tabela 6, é possível identificar efeitos positivos do choque de produtividade de uma tonelada/hectare da soja transgênica nas áreas médias de *Soja* (38,5%), *Cana* (17,0%) e *FP + AgPerene* (3,6%). Se por um lado a interpretação do efeito sobre a área de *Soja* é relativamente direta, não é possível

dizer o mesmo em relação aos efeitos positivos sobre as áreas de *Cana* e *FP + AgPerene*. No caso de *FP + AgPerene*, o coeficiente tem magnitude menor e não mantém significância nas especificações mais restritivas. Para a *Cana*, o resultado pode sugerir que haja uma certa complementariedade entre a expansão da *Soja* com o uso do solo *Cana* ou que haja alguma variável omitida, associada à expansão desse uso, que também seja correlacionada ao choque de produtividade da soja.

Por outro lado, em uma análise inicial, usos agropecuários que tendem a ser menos rentáveis, como *Pasto (+ Mosaico)* e *AgTemp*, e usos de vegetação natural, como *Floresta* e *FNNF*, parecem ser negativamente afetados pelo choque de produtividade da soja transgênica. Florestas perdem, em média, 1,8% da sua área ao ano para cada tonelada por hectare de soja gerada pelo choque de produtividade, enquanto *FNNF* perdem, em média, 2,6% de sua área. Por sua vez, os resultados para *Pasto* e *AgTemp* são ainda mais expressivos em termos percentuais: para cada tonelada por hectare de produtividade gerado pelo choque das sementes transgênicas da soja há perda média de 29,0% da área de *AgTemp* por ano e de 18,3% da área de *Pasto (+ Mosaico)*, levando em conta que um *grid* médio no Cerrado é ocupado por *Pasto* em 32% de sua área. Esses resultados sugerem o caráter misto do Cerrado – entre uma região na fronteira do desmatamento e uma região em parte ocupada –, uma vez que os usos estimulados pelo choque de produtividade da soja parecem ocupar tanto *Floresta* e *FNNF* (em menor escala), quanto *Pasto (+ Mosaico)* e outras agriculturas temporárias (*AgTemp*), que tendem a apresentar menor rentabilidade por hectare.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

Tabela 6. Diferenças-em-diferenças do CP da soja nos usos do solo do Cerrado, 1993-2012

Variáveis	(1) Soja (%)	(2) Floresta (%)	(3) FNNF (%)	(4) Pasto (%)	(5) AgTemp (%)	(6) Cana (%)	(7) FP e AgPerene (%)
Painel A: Controles meteorológicos e de UC e <i>two-way cluster</i> por <i>grid</i> e UF-ANO							
Choque produtividade soja (t/ha)	0,385*** (0,028)	-0,018*** (0,004)	-0,026*** (0,007)	-0,183*** (0,028)	-0,290*** (0,049)	0,170*** (0,026)	0,036*** (0,013)
Painel B: Controlando por tendência de UF e <i>two-way cluster</i> por <i>grid</i> e UF-ano							
Choque produtividade soja (t/ha)	0,414*** (0,035)	-0,007** (0,003)	-0,029*** (0,006)	-0,108*** (0,017)	-0,089*** (0,024)	0,134*** (0,029)	0,006 (0,013)
Painel C: Controlando por tendência de UF e potenciais choques com <i>cluster</i> por <i>grid</i> e tendência de UF							
Choque produtividade soja (t/ha)	0,455*** (0,037)	-0,008*** (0,003)	-0,022*** (0,007)	-0,105*** (0,017)	-0,043* (0,025)	0,120*** (0,027)	0,006 (0,013)
Observações	492,500	492,500	492,500	492,500	492,500	492,500	492,500
Efeitos fixos e tendência de UF	S	S	S	S	S	S	S
Cluster	TW	TW	TW	TW	TW	TW	TW
Periodicidade	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual

Fonte: Elaboração própria.

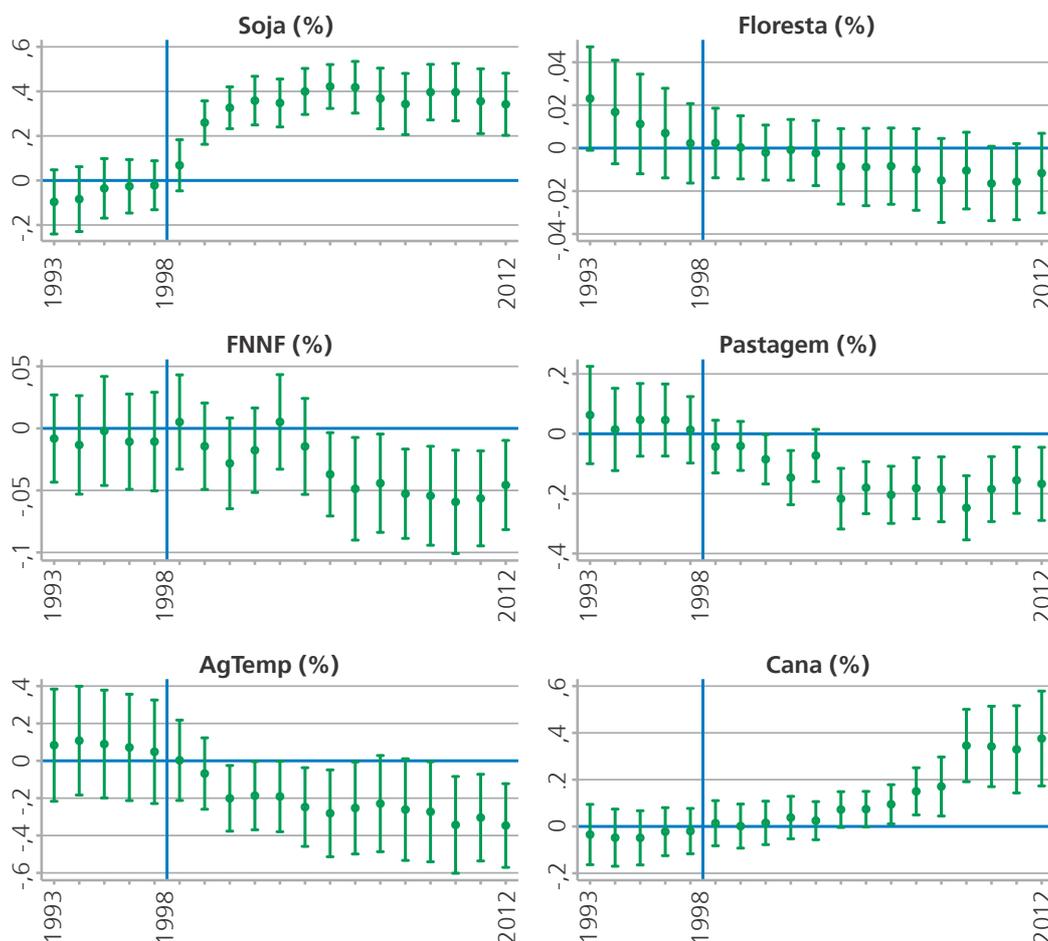
Os coeficientes encontrados nos painéis B e C apontam para resultados no mesmo sentido, exceto pela perda de magnitude do choque de produtividade da soja na área de *AgTemp* (no caso da especificação do painel A, perde-se também a significância a 5%), pela menor magnitude também observada para *Floresta* e pela perda de significância para o efeito positivo observado em *FP + AgPerene*. Assim, as especificações adicionais sugerem que os resultados são robustos, restando a análise da tendência pré-tratamento do *event study*, apresentado na figura 3.

No caso dos *event studies* para o Cerrado, destaca-se que aparentemente, todas as tendências pré-tratamento são estatisticamente insignificantes. Dessa forma, é possível argumentar que os resultados significativos encontrados na tabela 6 e na figura 3 não aparentam ser consequência de uma variável omitida pré-tratamento que estaria correlacionada à variável de tratamento, apesar de, no caso do uso *Floresta*, haver uma tendência pré-tratamento declinante estatisticamente não significativa. Considerando as tendências pós-tratamento para *Soja*, é importante destacar que o efeito estimado se dá de forma quase imediata após o tratamento. Desse modo, parece que a resposta dos produtores ao choque de produtividade acontece muito mais rapidamente nesse bioma que na Amazônia, o que pode ocorrer tanto pela maior ocupação da região, facilitando a transição de um uso agropecuário para outro, quanto pela proximidade maior com a região Sul do país, onde a semente transgênica da soja teria entrado de forma ilegal inicialmente.

No caso do efeito sobre *Floresta*, além da tendência pré-tratamento declinante – apesar de não significativa –, os efeitos pós-tratamento do choque de produtividade da soja, quando comparados ao último ano pré-tratamento (1998), não parecem manter significância. Dessa forma, o resultado do choque de produtividade da soja sobre a diminuição de área de *Floresta* no Cerrado parece não se sustentar como os demais. Logo, a opção mais segura e conservadora a partir da checagem de robustez é considerar que não existem efeitos estatisticamente significativos do choque de produtividade da soja transgênica em *Floresta*.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

Figura 3. *Event study* do efeito do CP da soja nos seis principais usos do solo para o Cerrado



Fonte: Elaboração própria.

De forma mais contraintuitiva, o *event study* parece assegurar que o efeito sobre o uso *Cana* do choque de produtividade da soja não parece resultar da existência de uma tendência pré-tratamento, dado que os coeficientes pré-tratamento são estatisticamente iguais a zero e relativamente bem comportados. O segundo ponto relevante é que há uma importante defasagem até que o efeito sobre a área de *Cana* seja percebido. Isso sugere que há alguma variável omitida, relevante para a expansão

são da área de *Cana* após 2002/2003, que esteja também relacionada à variável que mede o choque de produtividade da soja transgênica, ou que há algum benefício ou complementariedade do uso de *Cana* com a expansão da área de *Soja* induzida pelo choque de produtividade da soja transgênica. De todo modo, para que haja segurança sobre esse resultado é necessário que novos testes e estudos sejam realizados.

Por fim, a tabela 7 apresenta os coeficientes análogos das especificações anteriores para a Mata Atlântica. A partir do painel A, é possível identificar nas colunas (1) e (6) que, em média, um choque de produtividade da soja de uma tonelada por hectare aumenta, em cada *grid* *i* e ano *t*, 43,3% da área de *Soja* e 37,4% da área de *Cana* – resultados que se repetem em significância e magnitude ao observado para o Cerrado. Outro efeito positivo do choque de produtividade da soja foi encontrado na área de *Floresta* (em média 1,0%). Esse resultado possivelmente corrobora as contribuições preliminares de Assunção e Bragança (2015) e Szerman e outros (2022), além da transição florestal que Calaboni e outros (2018) observam para a Mata Atlântica.

Por outro lado, a área de *FNNF*, em média, perde 1,5% por ano a cada tonelada por hectare decorrente do choque de produtividade da soja transgênica na Mata Atlântica. Em termos percentuais, é um resultado mais expressivo do que os ganhos de *Floresta* no bioma, mas o uso *FNNF* é muito menos representativo do que o uso *Floresta*, ainda que ambos estejam saturados no bioma, como é possível observar nas estatísticas descritivas da tabela 1. Porém, os principais usos que cedem suas áreas para os demais são *Pasto* (+ *Mosaico*), *AgTemp* e *FP* + *AgPerene*: respectivamente, esses usos perdem, em média, a cada tonelada por

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

hectare de choque de produtividade da soja, 7,9%, 37,6% e 10,7%, e novamente é preciso destacar que a área de *Pasto + Mosaico* representa cerca de metade de um *grid i* genérico da Mata Atlântica.

Tabela 7. Diferenças-em-diferenças do CP da soja nos usos do solo da Mata Atlântica, 1993-2012

Variáveis	(1) Soja (%)	(2) Floresta (%)	(3) FNMF (%)	(4) Pasto (%)	(5) AgTemp (%)	(6) Cana (%)	(7) FP e AgPerene (%)
Painel A: Controles meteorológicos e de UC e two-way cluster por grid e UF-ano							
Choque produtividade soja (t/ha)	0,433*** (0,043)	0,010** (0,004)	-0,015** (0,007)	-0,079*** (0,010)	-0,376*** (0,054)	0,374*** (0,049)	-0,107*** (0,028)
Painel B: Controlando por tendência de UF e two-way cluster por grid e UF-ano							
Choque produtividade soja (t/ha)	0,219*** (0,027)	0,020*** (0,003)	-0,019** (0,009)	-0,037*** (0,008)	-0,224*** (0,042)	0,188*** (0,038)	-0,070*** (0,025)
Painel C: Controlando por tendência de UF e potenciais choques com cluster por grid e tendência de UF							
Choque produtividade soja (t/ha)	0,234*** (0,030)	0,018*** (0,003)	-0,014 (0,009)	-0,035*** (0,008)	-0,174*** (0,038)	0,099*** (0,029)	-0,059** (0,024)
Observações	281.900	281.900	281.900	281.900	281.900	281.900	281.900
Efeitos fixos e tendência de UF	S	S	S	S	S	S	S
Cluster	TW	TW	TW	TW	TW	TW	TW
Periodicidade	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual	Anual

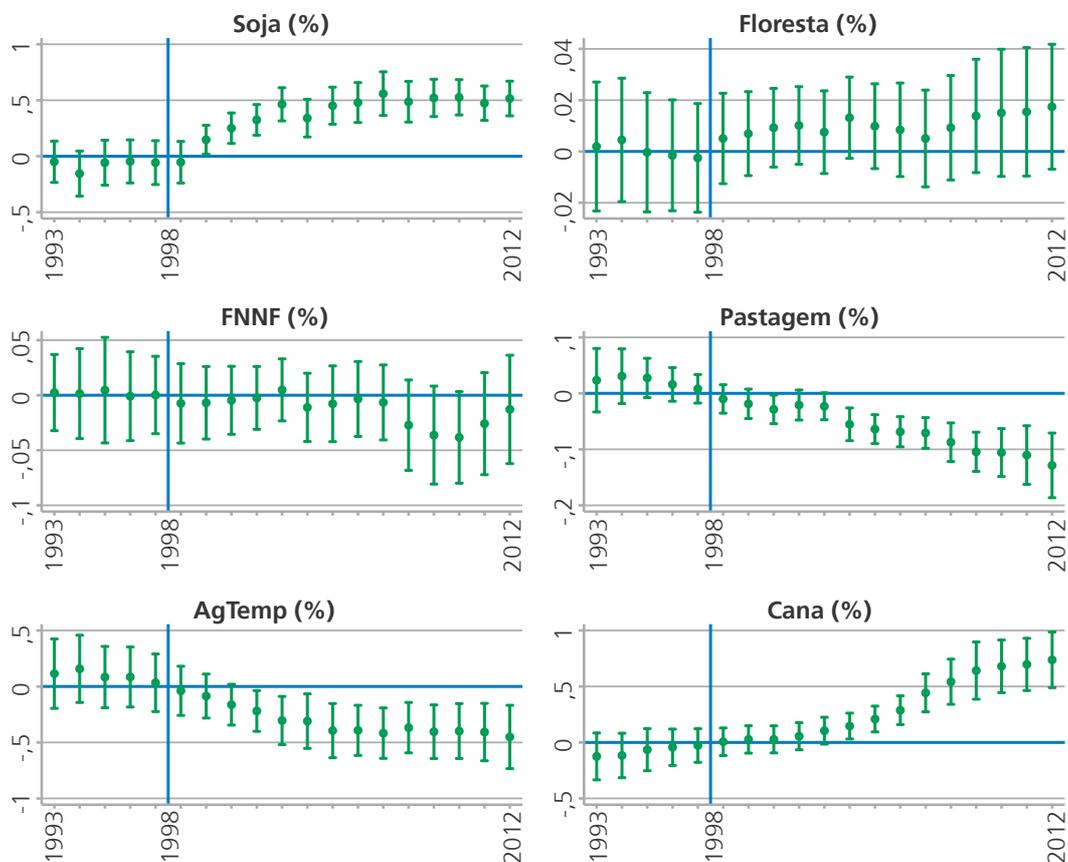
Fonte: Elaboração própria.

Considerando os coeficientes das especificações nos painéis B e C, é possível notar que todos os coeficientes, exceto *Floresta* e *FNMF*, apresentam menor magnitude, mas mesmo sinal e nível de significância. No caso do efeito positivo sobre a área de *Floresta*, as especificações com controles adicionais apresentam coeficientes consideravelmente maiores, enquanto na especificação do painel C o coeficiente para *FNMF* perde

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

significância. Dando continuidade aos testes de robustez, a figura 4 apresenta os *event studies* para a Mata Atlântica. De modo geral, as conclusões são muito próximas às observadas nos *event studies* do Cerrado, de modo que os resultados para *Soja*, *Pasto*, *AgTemp* parecem robustos no teste de tendência pré-tratamento, enquanto o mesmo não pode ser dito para os coeficientes de *Floresta* e *FNNF*, que não parecem ser significativos em comparação com o ano imediatamente anterior ao início do tratamento. No caso do efeito sobre a *Cana*, os resultados sugerem as mesmas conclusões do que foi dito para o Cerrado.

Figura 4. *Event study* do efeito do CP da soja nos seis principais usos do solo para Mata Atlântica



Fonte: Elaboração própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Choques de produtividade na agropecuária, como é o caso da introdução da semente transgênica da soja, podem ser indutores de *land sparing*, do mesmo modo que podem gerar outras externalidades no preço da terra, na rentabilidade da produção agropecuária e no nível de oferta desses produtos. A teoria de transição florestal, apesar de considerar imprescindível a intensificação da produção agropecuária, também sugere que essa intensificação por si só não é capaz de levar a um caminho de revegetação, podendo conduzir a um cenário de paradoxo de Jevons para o uso da terra. Choques de produtividade na agropecuária devem ser incentivados desde que estejam em consonância com políticas ambientais e de uso do solo que ajudem a induzir à conservação.

Considerando os resultados principais da última seção e o contexto discutido no decorrer deste trabalho, alguns destaques merecem atenção.

Primeiro, o efeito do choque de produtividade da soja tem resultados mais expressivos no Cerrado e na Mata Atlântica do que na Amazônia, ocorrendo nesses biomas majoritariamente em áreas já ocupadas pela agropecuária. É possível que isso aconteça porque é mais vantajoso economicamente expandir o uso da soja em áreas que já estão consolidadas e mais próximas de eixos econômicos e mercados internacionais do que na fronteira do desmatamento. A expansão da soja na fronteira pode ser demorada se houver a necessidade primeira de consolidação dessa fronteira.

Os resultados para a Amazônia são importantes para descrever o processo de consolidação de área de fronteira e trazer para discussão

o fato de que choques de produtividade em áreas de fronteira quase aberta podem aumentar o desmatamento. Nesse caso, é possível dizer que a introdução de uma tecnologia capaz de ser mais eficiente no uso da terra para a produção de uma *commodity* agrícola acaba expandindo a ocupação da terra, como um paradoxo de Jevons para o fator de produção terra. No mesmo sentido, choques de produtividade em regiões com usos naturais saturados como Cerrado e, principalmente, Mata Atlântica, apesar de potencialmente terem alguma influência em poupar terra, não parecem ter levado a uma trajetória consistente de transição florestal nesse contexto.

Os efeitos no uso do solo *Cana* verificados no Cerrado e na Mata Atlântica não são óbvios e podem até ser considerados contraintuitivos, uma vez que um choque de produtividade na soja deveria estimular a transição para o uso *Soja*, mas nem tanto para usos como *Cana*. Nesse caso, como visto a partir das matrizes de transição, não faz sentido acreditar que *Cana* é um uso intermediário para *Soja*. Portanto, é possível que exista alguma espécie de *spillover* da expansão da soja sobre a área de cana. Porém, para conclusões mais sérias, é importante que trabalhos futuros busquem entender melhor essa correlação.

É importante destacar que os coeficientes estimados refletem efeitos líquidos observados nas regiões e nos anos pós-tratamento. É possível, por exemplo, que ao mesmo tempo que o choque de produtividade da soja aumente a área de pasto como um uso intermediário para a soja, o choque de produtividade da soja também reduza a área de pasto pela ocupação desse uso por soja. Portanto, o sinal e a significância do coeficiente encontrado dependem da força desses dois efeitos em

cada região. Além disso, esses efeitos podem aumentar ou diminuir no tempo, sendo possível que, em um primeiro momento, o choque de produtividade estimule a área de pasto pela expansão da fronteira, mas, após determinado período, o pasto pare de se expandir para dar lugar à soja ou a outros usos mais rentáveis.

Por fim, é importante destacar novamente a importância de abordar esses efeitos considerando as heterogeneidades entre os biomas, principalmente tendo em vista os estágios de ocupação dessas regiões. Os resultados heterogêneos encontrados neste trabalho refletem, em sua maioria, aqueles esperados a partir de determinadas características regionais, de forma que generalizações sobre os efeitos de choques de produtividade e de intensificação na agropecuária podem levar a interpretações equivocadas.

Portanto, os resultados sugerem que, no contexto da introdução da semente da soja transgênica e do choque potencial de produtividade por ela provocado, a intensificação agrícola não foi suficiente para gerar um movimento de *land sparing* em direção a uma transição florestal. Pelo contrário, em regiões de fronteira agrícola o choque incentivou ainda mais a conversão de áreas florestais em áreas de pastagem – para só então algumas dessas áreas de pastagem se converterem em soja. Sendo assim, os resultados apresentados neste artigo estão em concordância com diversos estudos e com a própria teoria da transição florestal em sua completude, que argumentam não existir caminho automático da intensificação agrícola para a conservação florestal e revegetação. É preciso que um aparato de políticas ambientais seja direcionado para evitar que os incentivos econômicos gerados por choques de produtividade se consolidem em incentivos perversos no ponto de vista ambiental.

REFERÊNCIAS

20 ANOS depois da aprovação, transgênico se torna regra no campo. *Exame*, São Paulo, 2 set. 2018. Disponível em: <https://exame.com/brasil/20-anos-depois-da-aprovacao-transgenico-se-torna-regra-no-campo/>. Acesso em: 27 out. 2022.

ALVARENGA JUNIOR, M. *Decisões sobre o uso da terra em uma economia monetária da produção: uma abordagem pós-keynesiana do efeito indireto sobre o desmatamento na Amazônia Legal no período 2002-2011*. 2014. Dissertação (Mestrado em Economia) – Faculdade de Economia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2014.

ARIMA, E. Y. *et al.* Statistical confirmation of indirect land use change in the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, Bristol, v. 6, n. 2, p. 1-7, 2011.

ASSUNÇÃO, J.; BRAGANÇA, A. *Does technical change in agriculture increase deforestation? Evidence from the Brazilian Soybean Revolution*. Rio de Janeiro: Climate Policy Initiative, 2015.

ASSUNÇÃO, J. *et al.* *Agricultural productivity and deforestation in Brazil*. Rio de Janeiro: Climate Policy Initiative, 2017.

ASSUNÇÃO, J. *et al.* The effect of rural credit on deforestation: evidence from the Brazilian Amazon. *The Economic Journal*, Oxford, v. 130, n. 626, p. 290-330, 2020.

ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R. Deforestation slowdown in the Brazilian Amazon: prices or policies? *Environment and Development Economics*, Cambridge, v. 20, n. 6, p. 697-722, 2015.

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade
da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Download de dados geográficos. MMA, Brasília, DF, [2007]. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>. Acesso em: 27 out. 2022.

BURGESS, R.; COSTA, F. J. M.; OLKEN, B. A. *Wilderness conservation and the reach of the state: evidence from national borders in the Amazon*. Cambridge: National Bureau of Economic Research, 2018.

BUSTOS, P.; CAPRETTINI, B.; PONTICELLI, J. Agricultural productivity and structural transformation: evidence from Brazil. *American Economic Review*, Pittsburgh, v. 106, n. 6, p. 1320-1365, 2016.

BYERLEE, D.; STEVENSON, J.; VILLORIA, N. Does intensification slow crop land expansion or encourage deforestation? *Global Food Security*, Amsterdam, v. 3, n. 2, p. 92-98, 2014.

CALABONI, A. *et al.* The forest transition in São Paulo, Brazil: historical patterns and potential drivers. *Ecology and Society*, Dedham, MA, v. 23, n. 4, 2018.

CASTRO, B. S. *O processo de institucionalização da soja transgênica no Brasil nos anos de 2003 e 2005: a partir da perspectiva das redes sociais*. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais) – Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.

CEDDIA, M. G. *et al.* Governance, agricultural intensification, and land sparing in tropical South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Washington, DC, v. 111, n. 20, p. 7242-7247, 2014.

CÉLERES. *20 anos da adoção da biotecnologia agrícola no Brasil: lições aprendidas e novos desafios*. Uberlândia: Céleres, 2018. Disponível

Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil

em: http://www.celeres.com.br/wp-content/uploads/2014/10/20_anos_biotecnologia.pdf. Acesso em: 27 out. 2022.

CIB – CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA. 20 years of GMOs: environmental, economic and social benefits in Brazil. [S. l.]: CIB, 2018. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/publicacoes/20-years-of-gmos-environmental-economic-and-social-benefits-in-brazil/>. Acesso em: 27 out. 2022.

CORREIA-SILVA, D. C.; RODRIGUES, M. Federal enforcement and reduction of deforestation in the Brazilian Amazon. *Estação Científica (UNIFAP)*, Macapá, v. 9, n. 1, p. 75-88, 2019.

COSTA, L. A. N.; SANT'ANNA, A. A.; YOUNG, C. E. F. Barren lives: drought shocks and agricultural vulnerability in the Brazilian Semi-Arid. *Environment and Development Economics*, Cambridge, v. 27, n.3, p. 1-21, 2021.

DIAS, M.; ROCHA, R.; SOARES, R. Glyphosate use in agriculture and birth outcomes of surrounding populations. *IZA Discussion Paper* n° 12164. 2019.

EWERS, R. M. *et al.* Do increases in agricultural yield spare land for nature? *Global Change Biology*, Hoboken, v. 15, n. 7, p. 1716-1726, 2009.

FERREIRA FILHO, J. B. S.; HORRIDGE, M. Ethanol expansion and indirect land use change in Brazil. *Land Use Policy*, Amsterdam, v. 36, p. 595-604, 2014.

GAEZ – GLOBAL AGRO-ECOLOGICAL ZONES. GAEZ v3.0. Versão 3.0. Rome: GAEZ, 2012. Disponível em: <https://www.gaez.iiasa.ac.at/>. Acesso em: 27 out. 2022.

GANDOUR, C. *Forest wars: a trilogy on combating deforestation in the Brazilian Amazon*. 2018. Tese (Doutorado em Economia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

GARRETT, R. D. *et al.* Intensification in agriculture-forest frontiers: land use responses to development and conservation policies in Brazil. *Global Environmental Change*, Amsterdam, v. 53, p. 233-243, 2018.

GIL, J. D. B. *et al.* Tradeoffs in the quest for climate smart agricultural intensification in Mato Grosso, Brazil. *Environmental Research Letters*, Bristol, v. 13, n. 6, p. 1-11, 2018.

HARGRAVE, J.; KIS-KATOS, K. Economic causes of deforestation in the Brazilian Amazon: a panel data analysis for the 2000s. *Environmental and Resource Economics*, New York, v. 54, n. 4, p. 471-494, 2013.

HORNBECK, R. Barbed wire: property rights and agricultural development. *The Quarterly Journal of Economics*, Oxford, v. 125, n. 2, p. 767-810, 2010.

KUBITZA, C. *et al.* Land property rights, agricultural intensification, and deforestation in Indonesia. *Ecological Economics*, Amsterdam, v. 147, p. 312-321, 2018.

LAMBIN, E. F.; MEYFROIDT, P. Land use transitions: socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, Amsterdam, v. 27, n. 2, p. 108-118, 2010.

LAPOLA, D. M. *et al.* Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, Washington, DC, v. 107, n. 8, p. 3388-3393, 2010.

MAPBIOMAS. *Mapbiomas 6.0*. Versão 6.0. Brasília, DF: Mapbiomas, 2021. Disponível em: <https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Estat%C3%ADsticas/Cole%C3%A7%C3%A3o%20>

6/1-ESTATISTICAS_MapBiomias_COL6.0_UF-BIOMAS_v12_SITE.xlsx. Acesso em: 27 out. 2022.

MATHER, A. S. The forest transition. *Area*, London, v. 24, n. 4, p. 367-379, 1992.

MATSUURA, K.; WILLMOTT, C. J. *Terrestrial precipitation: 1900–2017 gridded monthly time series*. Newark: University of Delaware, 2018. Version 5.01.

MEYFROIDT, P.; LAMBIN, E. F. Global forest transition: prospects for an end to deforestation. *Annual Review of Environment and Resources*, San Mateo, v. 36, p. 343-371, 2011.

NOLTE, C. *et al.* Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, New York, v. 110, n. 13, p. 4956-4961, 2013.

PHELPS, J. *et al.* Agricultural intensification escalates future conservation costs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, New York, v. 110, n. 19, p. 7601-7606, 2013.

REYDON, B. P.; FERNANDES, V. B.; TELLES, T. S. Land governance as a precondition for decreasing deforestation in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, Amsterdam, v. 94, p. 104313, 2020.

RICHARDS, P. D.; WALKER, R. T.; ARIMA, E. Y. Spatially complex land change: the indirect effect of Brazil’s agricultural sector on land use in Amazonia. *Global Environmental Change*, Amsterdam, v. 29, p. 1-9, 2014.

RUDEL, T. K. *et al.* Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change*, Amsterdam, v. 15, n. 1, p. 23-31, 2005.

RUDEL, T. K. Tree farms: driving forces and regional patterns in the global expansion of forest plantations. *Land Use Policy*, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 545-550, 2009.

SÁ, S. A.; PALMER, C.; DI FALCO, S. Dynamics of indirect land-use change: empirical evidence from Brazil. *Journal of Environmental Economics and Management*, Amsterdam, v. 65, n. 3, p. 377-393, 2013.

SANT'ANNA, A. A. Land inequality and deforestation in the Brazilian Amazon. *Environment and Development Economics*, Cambridge, v. 22, n. 1, p. 1-25, 2017.

SANT'ANNA, A. A.; COSTA, L. Environmental regulation and bail outs under weak state capacity: deforestation in the Brazilian Amazon. *Ecological Economics*, Amsterdam, v. 186, p. 107071, 2021.

SEARCHINGER, T. *et al.* Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, Washington, DC, v. 319, n. 5867, p. 1238-1240, 2008.

SZERMAN, D. *et al.* *Agricultural productivity and deforestation: evidence from Brazil*. New Haven: EliScholar, 2022.

WALKER, R. The scale of forest transition: Amazonia and the Atlantic forests of Brazil. *Applied Geography*, v. 32, n. 1, p. 12-20, 2012.

YOUNG, C. E. F. *Economic adjustment policies and the environment: a case study of Brazil*. 1997. Tese (PhD em Economia) – Department of Economics, University College London, London, 1997.